



Perception visuelle des mouvements humains : Analyse comportementale, neuroimagerie et neuropathologie.

David Méary

► To cite this version:

David Méary. Perception visuelle des mouvements humains : Analyse comportementale, neuroimagerie et neuropathologie.. Sciences de l'Homme et Société. Université Pierre Mendès-France - Grenoble II, 2003. Français. NNT : . tel-00464923

HAL Id: tel-00464923

<https://theses.hal.science/tel-00464923>

Submitted on 18 Mar 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Pierre Mendès France, Grenoble II
Ecole Doctorale d'Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement
Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, C.N.R.S., UMR 5105

Thèse de doctorat
spécialité
Psychologie Cognitive
présentée par
David MEARY

**PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS HUMAINS :
ANALYSE COMPORTEMENTALE,
NEUROIMAGERIE ET NEUROPATHOLOGIE**

Directeurs de thèse :

Professeur Jean-Pierre Orliaguet (directeur)
et
Docteur Jean Decety (co-directeur)

Composition du jury :

Y. Coello	Professeur, Université Charles-de-Gaulle, Lille 3 – Rapporteur
V. Nougier	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble I – Rapporteur
J-P. Orliaguet	Professeur, Université Pierre Mendès France, Grenoble II – Jury
J-L. Velay	Chargé de Recherche C.N.R.S., I.N.P.C., Marseille – Jury
P. Viviani	Professeur, Université de Genève – Président

Soutenue publiquement le 04 décembre 2003

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	ii
Avant-propos	iv
Introduction	1
CADRE THEORIQUE	1
I. Système visuel et perception du mouvement.....	3
1. De la vision à la motricité	4
2. La perception visuelle du mouvement.....	9
3. Perception visuelle du mouvement : le système de poursuite	15
4. Résumé	20
II. La perception visuelle des mouvements "biologiques"	21
1. La reconnaissance des actions	22
2. Perception visuelle des mouvements et loi motrice : l'exemple de l'ellipse.....	30
3. Anticipation motrice et anticipation perceptive	37
4. Mouvement apparent et contraintes biomécaniques.....	41
5. Résumé	47
III. Tempo moteur spontané et tempo préféré.....	48
1. Le tempo moteur spontané	50
2. Le tempo préféré	56
3. Résumé	59
IV. Le mouvement imaginé.....	60
1. Mouvements imaginés : les représentations mentales motrices.....	61
2. Mouvements imaginés et principes moteurs	67
3. Résumé	71
V. Théories et modèles des relations perception/action	72
1. La théorie du codage événementiel	74
2. Une explication sensori-motrice de la conscience visuelle	77
3. Un schéma fonctionnel des interactions perceptivo-motrices	79
4. La théorie de la simulation motrice.....	81
5. Planification, contrôle et apprentissage des mouvements	84
6. Résumé	86
TRAVAUX EXPERIMENTAUX.....	87
VI. Anticipation perceptive et imagerie cérébrale	90
1. Méthode	91
2. Résultats	95
3. Discussion	98

VII. Analyse de la préférence perceptive pour la vitesse.....	102
1. Méthode.....	104
2. Résultats.....	108
3. Discussion	119
VIII. Préférence perceptive et mouvement imaginé.....	123
1. Méthode.....	124
2. Résultats.....	125
3. Discussion	128
IX. Préférence perceptive et principes moteurs	130
1. Méthode.....	132
2. Résultats.....	138
3. Discussion	147
X. Variabilité spatiale tolérée et tracés d'ellipses.....	149
1. Méthode.....	150
2. Résultats.....	151
3. Discussion	154
XI. Préférence perceptive et développement	156
1. Méthode.....	157
2. Résultats.....	158
3. Discussion	161
XII. Préférence perceptive et maladie de Parkinson	163
1. La maladie de Parkinson : un modèle pour l'étude des relations perception/action	164
2. Méthode.....	173
3. Résultats.....	176
4. Discussion	184
DISCUSSION GENERALE	185
1. Neuroimagerie	185
2. Préférence perceptive pour la vitesse	186
3. Discussion	190
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	193
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	204
INDEX DES TERMES	206
ANNEXES	209

REMERCIEMENTS

Avant tout, je voudrais remercier les institutions que sont l'éducation nationale et la recherche publique sans lesquelles ce travail de thèse n'aurait pas été possible. Ces institutions sont représentées par C. Courlet président de l'université Pierre Mendès France et par C. Marendaz directeur du laboratoire de psychologie et neurocognition (LPNC)¹. Je souligne, au passage, le rôle de l'école doctorale d'ingénierie pour la santé, la cognition et l'environnement (ED ISCE) dirigée par J. Demongeot.

Je remercie particulièrement mes directeurs de recherche, le professeur J-P. Orliaguet et le docteur J. Decety pour m'avoir fait partager leurs expériences et leurs connaissances. Les travaux présentés dans cette thèse ont été financés par une allocation de recherche du ministère de l'éducation nationale de la recherche et de la technologie (MENRT). Les recherches s'inscrivent dans le cadre d'un projet Cognitique déposé par le professeur J-P. Orliaguet.

Une partie des expériences présentées dans ce document ont été réalisées en collaboration avec d'autres unités de recherches. Je voudrais remercier l'INSERM² U 280 (Neurophysiologie de l'intentionnalité) et le CERMEP de Lyon (centre d'exploration et de recherche médicales par émission de positon, Bron). Je remercie T. Chaminade pour le traitement et l'analyse statistique des données de la tomographie par émission de position (TEP). Pour les recherches utilisant le modèle de la maladie de Parkinson, je tiens à remercier le professeur P. Pollak directeur de l'unité INSERM U 318 (Troubles du mouvement), ainsi que son équipe et, en particulier, C. Ardouin et A. Funkiewiertz.

Je tiens, également, à remercier M-T. Lallouache pour le développement des logiciels utilisés pour l'enregistrement et la présentation visuelle des stimuli.

¹ LPNC, CNRS UMR 5105, Université Pierre Mendès France, BP 47, 38040 Grenoble Cedex 09.

² Institut national pour la santé et la recherche médicale.

RESUME

Perception visuelle des mouvements humains : Analyse comportementale, neuroimagerie et neuropathologie

Cette thèse est consacrée à la perception visuelle des mouvements humains. L'objectif est de démontrer l'existence de liaisons fonctionnelles entre la perception et la motricité en utilisant des données issues de l'imagerie cérébrale, de l'étude de cas clinique (maladie de Parkinson) et de l'analyse comportementale de sujets adultes et d'enfants. Dans un premier temps, les recherches ont consisté à identifier les structures assurant ces liaisons fonctionnelles. La tomographie par émission de positon est utilisée pour révéler les réseaux neuronaux activés lors de la perception visuelle des mouvements d'écriture et de pointage. Les résultats indiquent que la perception de ces deux catégories de mouvements implique des structures distinctes ayant un rôle dans la planification et l'exécution de ces mouvements. Dans un second temps, les recherches ont consisté à préciser le rôle de ces liens entre perception et motricité. Dans ce but, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à un phénomène de préférence perceptive pour la vitesse, dans le cas des mouvements de traçage et de pointage. Après avoir démontré et analysé en détail ce phénomène de préférence perceptive, nous avons étudié la façon dont ces préférences sont modulées en fonction de la représentation que le sujet a du mouvement, de la longueur de la trajectoire, du type de mouvement, du niveau de développement moteur, et de l'état du système moteur des sujets (maladie de Parkinson). Les résultats principaux montrent que :

- 1) les valeurs des périodes préférées pour un cycle du mouvement révèlent l'existence d'une tendance centrale dans les choix ;
- 2) les périodes préférées sont comparables aux périodes des mouvements imaginés ;
- 3) la modulation de la période de référence du sujet dépend, comme dans le cas de l'exécution des mouvements, d'un tempo et d'un paramètre d'échelle ;
- 4) les valeurs de ces paramètres dépendent du type de mouvement, pour la perception comme pour l'action.

Cet ensemble de données permet de penser que la préférence perceptive s'appuie sur un processus de simulation motrice intériorisée du mouvement perçu se déroulant à un niveau implicite. La préférence perceptive pour la vitesse serait la manifestation d'une tendance naturelle du sujet à préférer des stimuli dynamiques conformes à sa propre motricité.

Mots clés : perception visuelle, mouvements de traçage et de pointage, préférence perceptive, lois motrices, simulation motrice.

Visual perception of human motion: Behavioral analysis, neuroimagery and neuropathology

This dissertation concerns the visual perception of human motions. The aim was to demonstrate the functional relations between perception and action using evidences from a neuroimaging study, the study of clinical cases (Parkinson's disease), and the analysis of adults and children behavior. Firstly, the research focuses on the identification of the structure that enables these functional relations. The positron emission tomography was used to reveal the neural network involved in the visual perception of writing and pointing movements. The results show that the perception of these two categories of movements activate distinct neural networks that also participate in the planning and the implementation of these movements. Secondly, the researches outline the role of these relations between perception and action. We focus on a phenomenon of perceptual preference for the velocity of drawing and pointing movements. After a demonstration and an analysis of this phenomenon, we study the way these preferences are modulated by the subject's representation of the motion, the length of the motion's trajectory and the category of the movement. The roles of the level of the subject's motor development and of the state of the subject's motor system (Parkinson's disease) are also tested. The main results show that :

- 1) the distribution of the favorite periods indicate a central tendency in the choices ;
- 2) favorite periods and imagined actions duration are comparable ;
- 3) as for real movements, the modulation of the perceptual preferences depends on a baseline tempo and a scaling factor ;
- 4) the values of the above mentioned parameters depend on the category of the movement as for perception and action.

Taken together, the results suggest that perceptual preferences rely on an implicit motor simulation of the perceived movement. The perceptual preference for movement velocity could reflect a natural tendency of the observer to prefer dynamic events that are compatible with its own motor system.

Keywords: visual perception, drawing and pointing movements, perceptual preference, motor principles, motor simulation.

AVANT-PROPOS

Les trois court-métrages présentés le 28 décembre 1895 au Grand Café à Paris, lors de la première projection publique du cinématographe, firent forte impression. Jamais, auparavant, le mouvement n'avait été aussi bien représenté. Pourtant, à cette époque où les caméras-projecteurs étaient à manivelle, le mouvement apparent des images ne conservait pas beaucoup du mouvement naturel. Le déplacement des personnages et des objets se trouvait précipité ou retardé et le mouvement restitué était finalement haché et syncopé. Ces altérations, bien que perçues par les spectateurs, ne gênaient cependant pas la compréhension de l'histoire. La scène — comme une mélodie — pouvait être jouée à des tempos différents et être, malgré cela, reconnue. Avec la motorisation des caméras et des projecteurs ces défauts ont été éliminés et il est possible, aujourd'hui, de transformer à volonté la durée des événements filmés. Augmenter ou ralentir le décours temporel d'une scène permet ainsi d'accéder aux détails du mouvement que notre perception ne peut saisir. Plus subtilement encore, la manipulation des caractéristiques temporelles du mouvement permet aux réalisateurs de susciter des émotions particulières chez le spectateur.

Avec les effets spéciaux, le cinéma montre que la réalité, telle qu'elle est représentée dans l'enchaînement des images, est manipulable. Mieux, le cinéma indique que ces manipulations peuvent être, ou non, perçues et interprétées par le spectateur. La modulation des aspects temporels du mouvement soulève de nombreuses questions concernant les caractéristiques de la perception visuelle. Par exemple, comment distinguons-nous le naturel du manipulé ? ou, plus subjectivement encore, le spontané de l'exagéré, le lent du rapide ? Sur quoi ces catégories sont-elles formées ou plutôt, comment le système nerveux rend-t-il ces catégories possibles ? Répondre à ces questions, c'est saisir comment le spectateur se rapporte à ce qui lui est présenté sur l'écran. Dans cette thèse, ce rapport est envisagé du point de vue de la motricité.

INTRODUCTION

Aujourd'hui, il ne fait aucun doute que les phénomènes mentaux, ne sauraient être expliqués au niveau d'une seule discipline. Le développement d'une approche pluridisciplinaire de ces phénomènes, incarnée par le courant dit des « neurosciences cognitives » (Gazzaniga, Ivry & Mangun, 1998) ou encore des « sciences cognitives », (Petitot, Varela, Pachoud & Roy, 1999), illustre la nécessaire collaboration des sciences du vivant et des sciences humaines. Cette thèse de psychologie cognitive s'efforce donc d'accorder une importance particulière aux concepts et aux théories développés dans d'autres disciplines comme la neurophysiologie ou la neurologie et plus généralement, la biologie, la philosophie ou les mathématiques. L'expression « phénomènes mentaux » renvoie ici à ce qui apparaît à la *conscience*³. Consciemment, le sujet perçoit, agit, pense, décide et c'est par l'intermédiaire de la conscience que les possibilités comportementales se révèlent à l'individu. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette question de la conscience. Pour l'instant, admettons simplement que les phénomènes mentaux résultent de l'activité du *système* nerveux.

Depuis les années 70, l'étude de la perception visuelle des mouvements humains souligne la sensibilité du système visuel aux régularités présentées par ces mouvements. Différentes recherches dans le domaine de la psychologie cognitive, et consacrées à l'analyse de cette sensibilité, ont permis de mettre en évidence l'existence de liaisons fonctionnelles entre la perception et l'action. Plus récemment, la neuroimagerie et l'électrophysiologie ont permis d'observer directement l'activité neurale associée à la perception des actions et aux mouvements imaginés. Dans leur ensemble, ces travaux ont montré que ces liaisons fonctionnelles s'appuient sur des réseaux neuronaux communs à l'action et à la perception. Nous présenterons des recherches qui confirmeront le rôle joué par ces structures dans l'activité perceptive.

³ Le vocabulaire spécifique — en italique dans le texte — est défini dans un lexique situé en fin de document. Les définitions données sont empruntées, selon les cas, à l'encyclopédie des sciences cognitives, éditée aux presses du MIT par Wilson & Keil (1999), aux dictionnaires des notions philosophiques édités au PUF, sous la direction d'André Jacob (1990) et au dictionnaire des mathématiques (Bouvier, George & Le Lionnais, 2001).

Afin d'analyser plus en détail le rôle de la motricité pour la perception, nous proposons de vérifier si, et auquel cas sur quels critères, les sujets attribuent une vitesse de référence aux mouvements humains. Nous tenterons de démontrer que la préférence perceptive des sujets (ce vers quoi tendent les réponses) est orientée et se déploie autour de valeurs centrales. Ces valeurs centrales, ces *attracteurs* vers lesquels convergent les jugements, retiendront particulièrement notre attention. Nous chercherons à en déterminer l'origine en mesurant leurs variations, et en comparant les caractéristiques temporelles de la perception et de l'exécution des actions.

Avant d'aborder cette partie expérimentale, nous allons présenter une revue de question concernant la perception visuelle des mouvements, et en particulier, la perception visuelle des mouvements humains.

Dans un premier temps, nous présenterons les caractéristiques neuroanatomique et neurophysiologique du système visuel les plus pertinentes pour notre recherche. Dans le second chapitre, après avoir expliqué la notion de mouvement « biologique », nous accorderons une importance particulière à la mesure de l'activité corticale associée à sa perception. Nous insisterons ensuite sur le rôle que jouent les indices cinématiques et dynamiques dans la perception des mouvements humains. Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la perception et de la production des séquences rythmiques. Les notions de tempo moteur spontané et de tempo préféré seront alors développées pour rendre compte de la distribution des réponses observées dans ces expériences. L'hypothèse d'un contrôle central des rythmes sera brièvement abordée. Le quatrième chapitre sera consacré aux études portant sur les mouvements imaginés. La mesure des caractéristiques temporelles des mouvements imaginés et réels fera alors l'objet d'une attention particulière. Nous verrons que les durées de ces mouvements concordent sous certaines conditions. Dans le cinquième chapitre nous donnerons un bref aperçu des théories et modèles contemporains de la perception et de l'action.

A l'issue de cette revue théorique, nous aborderons une seconde partie dans laquelle nous développerons notre approche expérimentale des relations entre la perception et l'action.

CADRE THEORIQUE

I. SYSTEME VISUEL ET PERCEPTION DU MOUVEMENT

L'anatomie mais aussi la neurophysiologie, la biochimie et, plus récemment, la neuroimagerie ont révélé, au cours des dernières décennies, certaines des caractéristiques de la structure et du fonctionnement du système visuel. Ce chapitre est centré sur trois aspects essentiels pour notre sujet. La connectivité des aires visuelles et motrices, le traitement du mouvement au niveau de l'aire temporale moyenne (MT⁴) et le contrôle du système de poursuite oculaire. En dépit du caractère général de cette revue, nous nous efforcerons ponctuellement d'entrer dans les détails afin de rendre compte de la *complexité* du système visuel et de son intégration dans l'ensemble formé par le système nerveux central (SNC). L'objectif de cette démarche est de rendre évidente la nécessité de penser la perception visuelle comme produit d'un système ayant comme caractéristique essentielle cette complexité. Ce système peut être étudié à différents niveaux hiérarchiques de l'organisation neurale (moléculaire, cellulaire, synaptique, connectivité). Nous garderons à l'esprit que les phénomènes observés à chacun de ces niveaux sont qualifiés de *chaotiques* (Arbib & Erdi, 1997). En définitive, ce chapitre a pour but essentiel d'enraciner la question de la perception visuelle des mouvements humains dans la structure qui, finalement, la rend possible.

⁴ L'aire V5, chez l'homme est considérée comme l'équivalent de l'aire MT chez le singe macaque. Les appellations MT, V5 ou MT/V5 sont utilisées dans la littérature.

1. DE LA VISION A LA MOTRICITE

Nous avons choisi dans cette partie de décrire succinctement la connectivité des aires visuelles et motrices. Après un bref rappel des caractéristiques fonctionnelles des fibres formant les radiations optiques, nous présenterons une représentation schématique des aires corticales impliquées dans les traitements visuels. Cette représentation est étendue aux aires ayant, classiquement, un rôle moteur (Rosseti & Pisella, 2001). Cette approche extensive se justifie car la possibilité de relations entre la perception et l'action dépend, fondamentalement, de l'existence de relations anatomiques entre vision et motricité.

1.1 Représentation schématique du système visuel

La séparation entre les neurones de type Parvocellulaire (P), Magnocellulaire (M), et Koniocellulaire (K) au niveau de la partie dorsale du corps Genouillé Latéral (cGLd) est maintenue au niveau de l'aire striée. Les neurones P du cGLd projettent sur la couche $4C_{\beta}$ de V1, les neurones M sur la couche $4C_{\alpha}$ et les neurones K sur les couches 2 et 3. Au-delà de cette étape, en revanche, il y a une recombinaison complexe des différentes entrées corticales en provenance du cGLd. L'enregistrement de la réponse des neurones M et P indique qu'ils diffèrent, entre autres, par leur sensibilité aux fréquences temporelles et spatiales. Les premiers sont adaptés pour traiter des stimuli ayant une fréquence temporelle élevée (éclair, déplacements dans le champ récepteur du neurone) et les seconds pour encoder les stimuli ayant une fréquence spatiale élevée. Dit autrement, et en simplifiant, les neurones M et P ont des réponses qui suggèrent qu'ils traitent, respectivement, le mouvement et les détails fins.

L'aire V1 est réciproquement connectée à un petit nombre d'aires, les aires du cortex pré-strié, elles-mêmes connectées à un réseau dense composé d'une douzaine d'aires corticales. Une représentation schématique des principales aires et connections est présentée dans la figure 1. Ce schéma part de la rétine et aboutit, par le jeu des connections entre les différentes aires corticales, à des zones directement et indirectement liées à la planification et au contrôle des mouvements, ainsi qu'à l'apprentissage et à la mémoire. La figure 1 souligne l'interdépendance entre ces différentes aires et, de fait, questionne l'idée d'une délimitation objective des seules zones composant le système visuel.

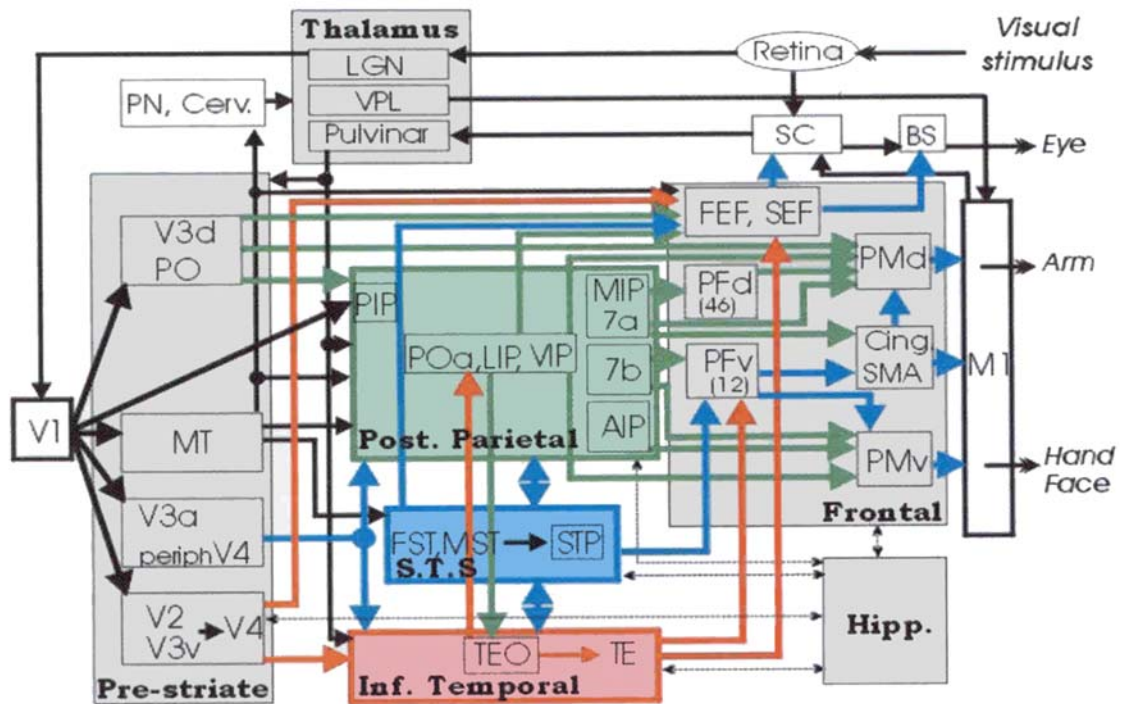


Figure 1. (d'après Rossetti & Pisella, 2001). Vision schématique d'ensemble des aires impliquées dans les transformations visuo-motrice chez le singe macaque. En plus des aires classiquement qualifiées de visuelles, cette figure schématise les réseaux corticaux et sous corticaux impliqués dans la transformation des entrées visuelles en sortie motrice. En accord avec les travaux de Ungerleider & Mishkin (1982) la voie ventrale est ici représentée en rouge et la voie dorsale en vert. Les auteurs (Rossetti & Pisella, 2001) considèrent que les deux voies visuelles corticales peuvent être envisagées comme deux voies occipito-frontales, parallèles. Certaines aires et certaines projections (en bleu) montrent une convergence de la voie dorsale et de la voie ventrale, en particulier au niveau du sillon temporal supérieur (STS). L'organisation spatiale du schéma ne reflète évidemment pas les positions relatives réelles de ces structures. Les flèches noires (épaisses) représentent la projection du stimulus sur la rétine, les connexions entre les différentes structures et, les sorties motrices. Les doubles flèches fines distinguent les relations avec l'hippocampe. Abréviations : SC : colliculus supérieur ; LGN : corps genouillé latéral ; VPL : noyau ventro-postero-latéral du thalamus ; PN : noyaux du pont ; Cerv : cervelet ; V1 : Aire visuelle primaire ; V2 : aire visuelle secondaire ; V3a : partie antérieure de l'aire visuelle tertiaire ; V3d : partie dorsale de l'aire visuelle tertiaire ; V3v : partie ventrales de l'aire visuelle tertiaire ; V4 : Partie du large territoire 19 de Broadman qui s'étend sur les extrémités caudales des lobes pariétal et temporal et comprend entre autre les aires V3 et MT. MT : aire temporelle moyenne ; PIP : partie postérieure de l'aire intrapariétale ; POa : aire pariéto-occipitale ; LIP : partie latérale de l'aire intrapariétale ; VIP : partie ventrale de l'aire intrapariétale ; MIP : partie mésiale de l'aire intrapariétale ; 7 : aire associative pariétale postérieure ; AIP : aire intrapariétale antérieure ; FST : aire temporelle supérieure profonde ; MST : aire temporelle supérieure moyenne ; STP : aire supérieure temporelle polysensorielle ; STS : sillon temporal supérieur ; TEO : aire occipito-temporelle ; TE : aire temporelle ; FEF : champ oculomoteur frontal ; SEF : aire oculomotrice supplémentaire ; PFd : partie dorsale du cortex préfrontal ; PFv : partie ventrale du cortex préfrontal ; PMd : partie dorsale du cortex prémoteur ; PMv : partie ventrale du cortex prémoteur ; SMA : aire motrice supplémentaire ; Cing : aire cingulaire ; Hipp : hippocampe ; M1 : aire motrice primaire.

Un consensus existe autour de l'idée d'une contribution importante des fibres magnocellulaires (M) à la formation d'une première voie visuelle avec un trajet occipito-pariétal (figure 1 : voie dorsale, en vert). Les fibres parvocellulaires (P) participeraient, pour l'essentiel, à la formation d'une seconde voie ayant un trajet occipito-temporal (figure 1 : voie ventrale, en rouge). Cette différenciation anatomique entre deux grandes voies corticales se double d'une spécialisation fonctionnelle (Ungerleider & Mishkin, 1982 ; Van Essen & Maunsell, 1983). Pour résumer, la voie dorsale a pour fonction principale d'extraire, dans le but de guider l'action, des informations spatiales et temporelles (la taille des objets, leur localisation, leur orientation, la direction et la vitesse des mouvements, etc...). Cette voie assurerait donc un rôle essentiel dans les transformations visuo-motrices par l'intermédiaire de circuits pariéto-frontaux décrits dans la partie suivante. En revanche, la voie ventrale serait surtout concernée par l'extraction des propriétés intrinsèques des objets, telles que leur forme et la couleur, dans un but d'identification de ceux-ci. Les cas d'ataxie optique (Perenin & Vighetto, 1988) et d'agnosie visuelle des formes (Goodale, Milner, Jacobson, & Carey, 1991) illustrent le rôle respectif de ces deux voies. L'atteinte de la voie dorsale, entraîne un trouble visuo-moteur mais laisse intacte la dénomination. L'atteinte de la voie ventrale produit un tableau clinique inverse. Ce modèle global du système visuel, étayé par la double dissociation a été baptisé modèle « double voie » (Goodale & Milner, 1992). Une revue détaillée des caractéristiques fonctionnelles des deux grandes voies visuelles a été récemment publiée (Norman, 2003).

Sur la base des latences d'activation des différentes aires incluses dans le système visuel, il est également possible de distinguer un circuit rapide (neurones de types M) – connectant les aires V1, MT, MST, 7 (aire associative pariétale postérieure) et 8 (champ oculomoteur frontal) – et un circuit lent (neurones de type P) se projetant essentiellement vers le cortex inféro-temporal en suivant la voie V4, TEO, TE (Bullier, 2001). Nous verrons que cette différence des vitesses de conduction pourrait avoir une signification fonctionnelle. Avant d'aborder ce point, il nous faut traiter rapidement de la question des connections entre aires visuelles et aires motrices.

1.2 Voies visuelles sous-corticales et corticales : de la vision à la motricité

Les aires pariétales projettent de nombreux neurones vers le cervelet par l'intermédiaire du pont⁵ alors que les aires temporales n'ont quasiment pas de projections directes vers cette région (Glickstein, 2000). Cette voie pariéto-ponto-cérébelleuse pourrait bien constituer une des voies sous corticale majeure connectant vision et motricité. Le rôle de cette voie visuelle sous-corticale est confirmé pour le contrôle des mouvements de l'œil et des mouvements du bras orientés vers des cibles. Elle constitue sans doute le support des fonctions visuelles résiduelles après lésion du cortex strié et semble être en liaison avec les voies réflexes végétatives du globe oculaire. Par ailleurs, le cervelet, les noyaux du pont et le colliculus supérieur entretiennent des liens directs et indirects avec le thalamus et, par conséquent, avec l'ensemble du système formé par le complexe des ganglions de la base⁶.

Ces liens permettent de supposer que ces voies jouent un rôle dans l'intégration des informations visuelles et motrices. Cependant, ce sont les voies corticales reliant, indirectement, les aires occipitales et frontales qui fournissent sans doute le support le plus évident pour ce type d'intégration. La première étape sur cette voie est le cortex pariétal (Sakata & Taira, 1994 ; Chapman, Gavrilescu, Wang, Kean, Egan & Castiello, 2002). Ce lobe, en particulier sa partie postérieure, est composé d'une mosaïque d'aires dont le rôle semble fondamental pour la transformation de l'information visuelle pour l'action. Ces aires (en particulier les subdivisions de la berge latérale du sillon intrapariétal, AIP, VIP, LIP) projettent des axones vers des subdivisions de l'équivalent, chez le singe, de l'aire 6 de Broadman (cortex pré-moteur). De nombreuses études sur le singe macaque, (Fadiga, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 2000) montrent que cette zone est également composée d'aires distinctes qui projettent en retour des axones vers les

⁵ Le tronc cérébral, subdivision du système nerveux central (moelle épinière allongée, tronc cérébral, cervelet, cerveau) est formé lui-même de trois parties : la moelle allongée (bulbe rachidien), le pont (protubérance annulaire), et le mésencéphale. Les noyaux au niveau du pont sont essentiellement des noyaux segmentaires (noyaux des nerfs crâniens).

⁶ Le complexe des ganglions de la base comprend les ganglions de la base proprement dits (putamen, noyau caudé, globus pallidus, substance noire et noyau sous-thalamique), le thalamus, et un certain nombre d'aires corticales. Des zones motrices projettent directement sur le putamen et des zones sensorielles et associatives projettent sur le noyau caudé. Il est supposé que le striatum (l'ensemble putamen et noyau caudé) est un centre d'intégration de ces messages (Obeso, Rodríguez-Oroz, Rodríguez, Lanciego, Artieda, Gonzalo & Olanow, 2000).

aires pariétales. Les aires motrices et visuelles sont ainsi en relation directe par l'intermédiaire de boucles cortico-corticales parallèles formant de véritables circuits pariéto-frontaux. Par ailleurs, les aires inféro-temporales de la voie ventrale projettent indirectement sur le cortex pré-moteur par l'intermédiaire de la partie ventrale du cortex préfrontal. Finalement, le cortex pariétal postérieur et le cortex temporal inférieur projettent des axones vers la scissure temporale supérieure (STS).

Cette région du STS, en particulier l'aire STPa, contient des neurones activés par la présentation de mouvements « biologiquement plausibles », comme la marche (Oram & Perrett, 1994), et projette des axones vers le cortex pré-moteur. L'examen des propriétés du champ récepteur des neurones situés dans les subdivisions de l'aire 6 suggère que ces derniers peuvent être qualifiés de sensori-moteurs (Fadiga et al, 2000). Ils répondent à la fois lors de stimulations (visuelle, tactile...) et lors de l'exécution de mouvements. De telles propriétés laissent supposer un rôle fondamental de ces neurones dans l'intégration visuo-motrice. De manière plus spéculative, la signification fonctionnelle de leur réponse est généralement interprétée dans le sens d'une contribution motrice à l'activité perceptive. Nous reviendrons sur cette hypothèse dans les chapitres suivants.

1.3 Conclusion

Le système visuel se caractérise, entre autre, par l'importance et la large distribution des territoires qui le compose ainsi que par une organisation sérielle et parallèle avec le plus souvent des connexions réciproques entre les aires. Les informations visuelles convergent plus ou moins directement, par l'intermédiaire de voies corticales et sous corticales, vers des aires motrices. Les caractéristiques fonctionnelles des neurones des aires pariétales, temporales et frontales suggèrent une sensibilité à une catégorie de mouvements particuliers : les mouvements biologiquement plausibles. Ces mouvements feront l'objet du prochain chapitre. Pour l'instant il s'agit d'aborder la question de la perception visuelle du mouvement.

2. LA PERCEPTION VISUELLE DU MOUVEMENT

Dans cette partie, nous allons rapidement aborder la question du traitement de la direction et de la vitesse des mouvements au niveau de l'aire MT et des territoires adjacents. L'aire MT constitue une des premières étapes le long de la voie dorsale (Maunsell & Van Essen, 1983). Des travaux récents offrent l'occasion de saisir les mécanismes de l'intégration du mouvement au niveau de cette zone. Nous allons voir que la sensibilité globale de la population de MT reflète une préférence pour certaines valeurs de la vitesse des stimuli présentés. Il s'avère également que le niveau d'activité de cette population corrèle avec les délais nécessaires à la prise de décisions concernant la direction du mouvement.

2.1 L'aire MT et les territoires adjacents

Les neurones M du cGLd, de la couche IVb de V1, des bandes épaisses de V2 ainsi que ceux de l'aire MT sont sensibles au mouvement d'un réseau lumineux sinusoïdal se déplaçant dans leurs champs. Leur réponse dépend également de la direction du mouvement et de l'orientation du réseau (Maunsell & Van Essen, 1983). Les neurones de l'aire MT ont des champs récepteurs dont la surface est 60 à 100 fois plus grande que ceux de V1 (0.5° d'angle visuel). Ces champs récepteurs sont organisés avec une zone de pourtour suppressive de même préférence directionnelle que la zone centrale. Le stimulus optimal pour une cellule ayant ces propriétés est un objet traversant la zone centrale et se déplaçant contre le mouvement d'un fond (Allman, Miezin & McGuinness, 1985).

La lésion sélective de l'aire MT ne produit qu'un déficit partiel et compensable de la perception de la direction du mouvement. Seule la destruction ou l'inactivation de nombreuses aires situées dans la périphérie de MT produit une perturbation irréversible et massive du traitement des informations de mouvements (Newsome & Pare, 1988). Ces résultats, obtenus chez le singe, confirment les conclusions de l'étude clinique d'un cas rare d'akïnétopsie (Zihl, von Cramon & Mai, 1983). La patiente M.P. atteinte de lésions bilatérales des lobes temporaux et pariétaux, incluant systématiquement les régions postérieures et latérales du gyrus temporal moyen, présente un grave déficit de la perception du mouvement. Pour M.P. le monde est perçu sous la forme d'une

succession d'instantanés. Les liquides en mouvement sont figés, et anticiper le moment où une tasse de thé sera remplie est difficile parce que le niveau « monte par à-coups ». Le trouble se limite à la perception du mouvement. Les performances de M.P. sont normales dans des tâches d'identification de formes ou de couleurs. Des objets ou des lettres sont correctement perçus, même lorsqu'ils sont présentés brièvement.

2.2 Le traitement de la vitesse du mouvement au niveau de MT

Les observations précédentes indiquent que plusieurs zones autour de la partie postérieure du gyrus temporal moyen pourraient jouer un rôle dans la perception du mouvement. Au sein de cet ensemble d'aires, plus ou moins clairement identifiées, l'aire MT a été particulièrement étudiée. Les travaux de Maunsell et van Essen (1983) montrent que l'activité des cellules de MT dépend de la vitesse du déplacement d'une barre lumineuse. L'exemple aujourd'hui classique est celui d'un neurone donnant une réponse optimale pour une barre lumineuse traversant son champ récepteur à une vitesse de 64°/s.

Dans une étude plus récente, Perrone & Thiele (2001), testent chez le singe la sensibilité à la vitesse de 84 neurones de l'aire MT. Ils utilisent les classiques réseaux lumineux sinusoïdaux (considérons seulement le paramètre fréquence en cycle par degré d'angle visuel) animés d'un mouvement (fréquence temporelle en nombre de période par seconde) dans le sens de leurs directions préférentielles (estimées par prétest). Chaque neurone est testé pour trente combinaisons de 6 fréquences spatiales (0.2 ; 0.4 ; 0.7 ; 1.4 ; 2.8 ; 5.6 *c/deg*) et 5 fréquences temporelles (1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 16 *Hz*). La réponse du neurone peut être représentée en fonction de ces deux dimensions (figure 2). La fonction de sensibilité d'un neurone de MT est souvent orientée et allongée relativement aux axes. Cette caractéristique suggère que les deux dimensions (fréquence temporelle et fréquence spatiale) sont inséparables. Autrement dit, la réponse du neurone reflète une réelle sensibilité à la vitesse, indépendamment de la combinaison de fréquence spatiale et temporelle dont cette dernière est dérivée. Sur la base de ces résultats, les auteurs développent le modèle WIM (Weighted Intersection Mechanism model) qui permet de déduire les champs récepteurs orientés de MT des fonctions exprimant la sensibilité aux fréquences temporelles et spatiales des neurones de V1 (Perrone & Thiele, 2002).

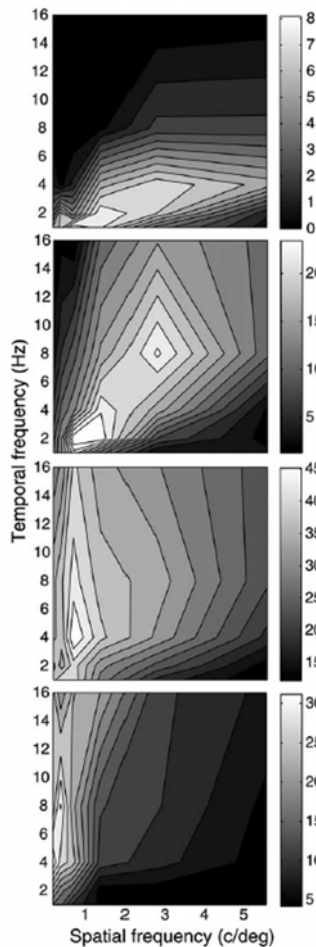


Figure 2. Représentation temps /espace de la sensibilité de quatre neurones de MT en réponse à des barres verticales animées d'un mouvement dans le sens de leur direction préférentielle. A droite, la réponse est donnée en impulsion par seconde d'après Perrone & Thiele (2001). Les neurones 1, 2, et 4 (de haut en bas) sont respectivement orientés pour des vitesses de 1, 3 et 32°/s. Le champ récepteur du neurone 3 est séparable (voir texte).

Entre V1 et MT, les réponses soutenues des cellules X, et les réponses transitoires des cellules Y (qu'il s'agisse de cellules simples ou complexes) seraient combinées. La forme orientée des champs récepteurs au niveau de MT résulterait des différences de sensibilité de ces deux types de cellules. Les auteurs fournissent des explications détaillées concernant l'implémentation du modèle (Perrone & Thiele, 2002).

On suppose des mécanismes similaires chez l'humain sur la base de la mesure des seuils de discrimination pour la vitesse (Reisbeck & Gegenfurtner, 1999). Les contours de discrimination pour la vitesse sont orientés dans le plan temps/espace, conformément aux observations précédentes. La fraction de Weber (le rapport entre la plus petite différence notable et le niveau de base du standard de la comparaison) pour la vitesse est de l'ordre de 5 % (Snowden & Braddick, 1991). Des valeurs de l'ordre de 5-12 % sont rapportées par Reisbeck & Gegenfurtner, (1999). Le plus intéressant pour notre recherche, c'est que l'étude et la modélisation de la sensibilité individuelle des neurones de MT à la vitesse permet d'estimer la sensibilité globale (populationnelle) de cette zone.

2.3 Vitesse des stimuli et réponses de MT

Bien qu'en théorie un seul neurone de MT puisse suffire pour voir apparaître une sensibilité à la vitesse il est généralement admis que la réponse de plusieurs neurones est intégrée. La vitesse de référence d'un neurone peut prendre des valeurs très variables, 1, 3, 32 et 64 %/s pour les exemples donnés ici. Ces neurones peuvent également répondre pour une gamme de vitesse importante (de 8° à 300° par secondes

dans l'exemple de Maunsell & Van Essen, 1983). Dans cette même étude, l'activité combinée de la population de neurones testée était optimale pour une vitesse de 32 %/s. L'étude de Perrone & Thiele (2001) permet d'avoir une idée plus précise de la distribution des vitesses de références des neurones de MT.

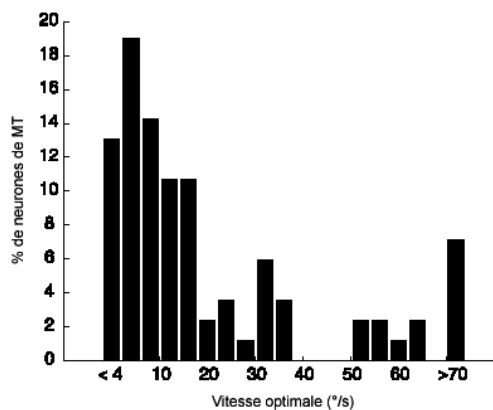


Figure 3. Distribution de la population de 84 neurones testée dans l'expérience de Perrone & Thiele, (2001). La distribution est considérée comme bimodale par les auteurs. Une large majorité des neurones de la population testée se situe entre 1 et 20 %/s.

La répartition des 84 neurones testés dans cette l'étude, en fonction de leur vitesse préférée, est précisée dans la figure 3. La médiane de cette distribution est de 11,5 %/s, la moyenne est de 22,67 %/s ($\sigma = 32,2$ %/s). Toutefois, aucune précision n'est donnée concernant les modalités de l'intégration de la réponse de larges ensembles neuronaux au niveau de MT. Il est généralement fait référence au codage vectoriel de la direction des mouvements du bras (Georgopoulos, 1991). Nous reviendrons sur ce mode de codage dans le chapitre suivant.

2.4 Activité de MT et décision perceptive

Au niveau de MT, chez le singe, l'activité unitaire d'un ensemble de neurones peut être enregistrée pendant que l'animal est engagé dans une tâche de décision perceptive (Britten, Shadlen, Newsomz & Movshon, 1992). Dans cette tâche, la direction globale du mouvement d'un ensemble de points doit être estimée par l'animal. Le singe est entraîné à fixer un point pendant la présentation en vision péri-fovéale du stimulus (1 s). La cohérence du stimulus (la proportion de points se déplaçant dans la même direction) est variée par les expérimentateurs. La réponse donnée par l'animal est une saccade oculaire en direction d'une cible située à droite lorsque le mouvement global est dirigé vers la droite ou en direction d'une cible située à gauche si le mouvement global est dirigé vers la gauche. L'estimation de la préférence directionnelle moyenne de la population de neurones de MT testée permet de prédire la décision qui sera prise par le singe. De plus, la cohérence du stimulus influence la rapidité de cette prise de décision (le délai avant l'exécution de la saccade). Lorsque le mouvement est

fortement cohérent, l'accord de la population de neurones testée est important. C'est-à-dire que les neurones de MT activés par le stimulus ont une même préférence directionnelle. Pour de faible niveau de cohérence la direction du mouvement global est plus ambiguë. Les réponses codées par les neurones activés donnent des informations contradictoires : le délai pré-saccadique s'allonge et les erreurs augmentent. En deçà d'un minimum d'accord de la population il devient impossible de détecter la direction du mouvement.

Une vision plus détaillée du processus conduisant de l'activation des neurones — au niveau des aires MT et MST — à la planification d'une saccade vers la droite ou la gauche — au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral (DLPFC) — est fournie par l'étude de Kim & Shadlen (1999). Dans les études précédentes, l'activité au niveau des aires MT et MST est dépendante de la présence du stimulus. Lorsque celui-ci disparaît, les neurones de ces aires retrouvent leur niveau de base. La décision ou, du moins, les éléments nécessaires à son expression, doit donc être encodée et maintenue pendant la période où le stimulus est absent. Les résultats de Kim & Shadlen (1999) suggèrent que le cortex préfrontal joue un rôle important dans l'intégration des signaux en provenance des aires MT et MST. Cette zone est active pendant la présentation du stimulus et cette activité — qui se bâtit graduellement comme le suggère l'analyse pour de faible niveau de cohérence du stimulus — prédit l'exécution d'une saccade vers la droite ou vers la gauche. L'observation fondamentale dans cette expérience est que les neurones de cette zone ont une activité qui se maintient pendant le délai entre la disparition du stimulus et la production de la saccade. Il est supposé par les auteurs que l'activité préfrontale reflète la transformation du signal sensoriel au niveau de MT et MST en une décision : la planification d'une saccade dans une direction donnée.

2.5 Conclusion

Chez le singe macaque, les résultats concernant l'aire MT suggèrent que cette zone, associée à la voie dorsale, est un lieu d'intégration des informations concernant les déplacements dans le réseau optique ambiant. L'activité des neurones de cette aire, en réponse à des stimuli de vitesses variables, reflète une préférence pour des vitesses comprises entre 1 et 70 °/s. La majeure partie des neurones testés semble cependant être accordée à des vitesses comprises entre 1 et 20 °/s. La moyenne des vitesses de références varie cependant de 22 à 32 °/s (médiane = 11,5 °/s). L'activité de MT, en liaison avec l'aire MST et le cortex préfrontal, participe à la détection de la direction du mouvement global d'un ensemble de points et à la planification d'une saccade dans la direction de ce mouvement. La plupart des expériences présentées dans cette partie utilisaient un point de fixation, évitant, autant que possible, que l'animal n'utilise le système de poursuite oculaire.

3. PERCEPTION VISUELLE DU MOUVEMENT : LE SYSTEME DE POURSUITE

L'apparition d'un objet en mouvement dans le champ visuel déclenche une réponse lente de l'œil après un délai de 100-150 *ms*. Ce délai correspondrait à l'estimation de la vitesse de la cible. L'accélération initiale et la direction du mouvement lors de cette réponse lente de l'œil dépendent en effet de la vitesse du déplacement de l'image rétinienne (Carl & Gellman, 1988). L'accélération maximale de l'œil est de l'ordre de 50 %/s et est obtenue pour une vitesse de cible de 10 %/s. Après cette phase initiale (durée : 80 à 100 *ms*), une saccade⁷ positionne rapidement ($v_{\max} = 600^\circ/\text{s}$) l'œil à proximité de la cible. Le délai séparant l'apparition de la cible de l'exécution de la saccade est plus important que celui nécessaire pour initier la poursuite. Cette différence suggère que les informations concernant la vitesse de la cible sont plus rapidement utilisables que celles concernant sa position. A l'issue de la saccade oculaire, qui permet de capturer la cible sur la fovéa, la poursuite s'effectue de manière lisse pour les cibles ayant une direction et une vitesse constante, pourvu que ce dernier paramètre soit dans les limites du système de contrôle (jusqu'à 100 %/s). La phase initiale est considérée comme dépendante du glissement de l'image rétinienne. Ce type de contrôle implique des délais de l'ordre de 100 *ms*. Lors de la seconde phase, post-saccadique, les mouvements de poursuites ont des caractéristiques qui traduisent plutôt un contrôle prédictif.

3.1 Contrôle prédictif de la poursuite oculaire

Les différents aspects du contrôle de la poursuite oculaire — notamment le codage du signal d'entrée, la commande et le maintien de la réponse appropriée — semblent se distribuer en parallèle sur de nombreuses structures. Nous avons déjà cité les aires MT et MST. Parmi les zones directement engagées dans la commande de la poursuite il faut noter également le cortex pariétal postérieur, l'aire oculomotrice frontale, le noyau dorso-latéral du pont, le cervelet, et les noyaux vestibulaires.

⁷ La durées des saccades (D) peut être approchée, pour des valeurs d'amplitude (Θ) comprises entre 5 et 50°, par la relation $D = D_0 + m\Theta$, où m vaut 2-3 ms et D_0 vaut 20-30 ms (Crommelinck & Guitton, 1994).

De nombreux travaux suggèrent que les systèmes oculomoteurs humains, et en particulier le système de poursuite, opèrent sur une base de connaissances *a priori* qui permet de prévoir les événements et les conséquences des actions. Ces événements et leurs conséquences seraient accessibles sous la forme de représentations internes au CNS. Ces modèles internes ou schémas peuvent être envisagés comme des unités de connaissance, chacune d'elles correspondant à la représentation d'un domaine d'interaction avec l'environnement, constamment remises à jour à partir des données actuelles (Arbib, 1981 ; Flanagan & Wing, 1997 ; Wolpert & Kawato, 1998 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Le système oculomoteur semble effectivement capable de travailler selon un mode descendant, c'est-à-dire en utilisant de l'information représentée pour guider l'action. Nous donnons deux arguments en faveur de cette interprétation. Le premier s'appuie sur les capacités du système de poursuite, et le second sur le phénomène d'inertie représentationnelle.

3.2 La poursuite de trajectoires complexes

Imaginons la situation suivante : un observateur dont la tête est fixe suit des yeux le mouvement d'un point le long d'une trajectoire circulaire. Avec une mesure appropriée des déplacements de l'œil, il est possible de comparer la position de l'œil et celle de la cible au temps t . Une erreur de position rétinienne (EPR en degré) peut alors être calculée. Il devient également possible d'estimer le décalage temporel entre ces deux mouvements. Dans le cas d'une trajectoire circulaire, et si la vitesse du point est constante, moins de 10 ms séparent la cible de l'œil. En revanche, dans le cas où le déplacement de la cible est aléatoire, la poursuite proprement dite devient impossible et se résume à une suite de saccades entrecoupées de courtes phases de poursuite.

Dans une expérience de Leung & Kettner, (1996) des singes macaques sont entraînés à poursuivre une cible qui se déplace dans le sens inverse des aiguilles d'une montre le long d'une trajectoire circulaire ($\varnothing = 5^\circ$, $v = 1 \text{ Hz}$). Un brusque changement de la direction de la cible, jusque là, poursuivie en continu avec une grande précision apparaît lors du 4^{ème} cycle. Les résultats de l'analyse du mouvement de poursuite indiquent que près de 90 ms sont nécessaires pour noter une modification de la trajectoire de l'œil. Pendant cette période, l'œil continue à poursuivre la cible sur son trajet habituel. Ce délai reflète donc le temps nécessaire pour que le changement de

trajectoire affecte la sortie motrice. Ensuite, un mouvement lent de l'œil dans la direction de la perturbation est observé pendant 50 *ms*, puis une saccade ramène l'œil sur la cible. Dans cette expérience, les auteurs utilisent également des trajectoires plus complexes en combinant des fonctions sinusoïdales de différentes fréquences et de différentes amplitudes. Dans ces situations, où aucune perturbation n'est appliquée, le système de poursuite parvient à maintenir l'écart temporel en deçà des 20 *ms*. Des décalages plus importants peuvent cependant être observés au moment où les changements de direction sont les plus abrupts.

Les résultats concernant les trajectoires complexes indiquent que les modèles internes — qui fourniraient au système de poursuite les informations nécessaires à la réduction du délai entre l'œil et la cible — sont capables de prédire des trajectoires inédites. Ils montrent, en ce sens, une capacité de généralisation. Cette dernière a cependant ses limites. En effet, d'autres travaux indiquent que ces capacités de généralisation dépendent essentiellement d'un principe de co-variation entre la vitesse de la cible et la courbure de la trajectoire que nous décrirons dans le chapitre suivant (loi de puissance $2/3$). L'erreur moyenne de position rétinienne et le nombre de saccades sont plus importants pour les cibles mobiles ne respectant pas ce principe, même pour des trajectoires simples (de'Sperati & Viviani, 1997).

3.3 Le phénomène d'inertie représentationnelle⁸

Pour qu'une représentation de l'état de l'environnement soit efficace pour guider l'action, il semble nécessaire qu'elle intègre les caractéristiques dynamiques de l'environnement (Freyd, 1993 ; Viviani, 2002). Un argument en faveur de cette idée de représentation dynamique, qui précise les compétences des modèles internes utilisés pour guider l'action, est apporté par le phénomène d'inertie représentationnelle (Freyd & Finke, 1984). Lorsque l'on observe un point mobile et que cet objet disparaît subitement, le souvenir de sa dernière position perçue est décalé dans le sens du mouvement en cours. Cette anticipation prend en compte non seulement la valeur de la vitesse du mouvement (Freyd & Finke, 1985), mais aussi son accélération (Finke, Freyd

⁸ Traduit de l'anglais « representational momentum »

& Shyi, 1986). Il semble donc que le système perceptif ait tendance à extrapoler la position future des objets en mouvement.

Nous avons vu que le système de poursuite oculaire utilisait un mode de contrôle basé sur de l'information modélisée par le SNC. Quel est exactement le rôle joué par les mouvements des yeux dans le phénomène d'inertie représentationnelle ? Une série d'études fournit des réponses à cette question (Jordan, Stork, Knuf, Kerzel & Müsseler, 2002). Dans l'expérience principale, un point lumineux ($\varnothing = 0.5^\circ$) se déplace le long d'une trajectoire circulaire ($\varnothing = 11^\circ$). Deux vitesses sont possibles (3.85 et 15.4 °/s). La tâche consiste soit à suivre le mouvement du point jusqu'à ce qu'il disparaisse soit à fixer une croix au centre du centre pendant que le point se déplace et disparaît. Dans les deux cas, et immédiatement après la disparition du point, les sujets devaient indiquer sa dernière position avec un curseur. Dans la condition classique (poursuite) l'effet d'inertie représentationnelle est observé. Il dépend de la vitesse, conformément aux résultats de Freyd & Finke, (1985). Dans la condition de fixation en revanche, l'effet est inversé. La position indiquée par les sujets se situe avant celle où la disparition prend place. Un mouvement des yeux doit être implémenté pour observer le phénomène d'inertie représentationnelle. Ce dernier dépendrait donc de la planification de l'action et, sans doute, du rôle que jouent les modèles internes dans ce processus. Dans une autre condition les sujets peuvent décider eux-mêmes de la disparition du point en appuyant sur un bouton. Dans ce cas l'effet d'inertie représentationnelle est également absent. L'absence d'effet lorsque le sujet contrôle le dispositif suggère que les modèles internes permettent d'accorder la commande d'arrêt de la cible avec la localisation fixée pour sa disparition. L'introduction d'un délai de 107 ms (non détecté par les sujets) affecte sensiblement cette capacité. Les sujets indiquent la localisation planifiée de disparition de la cible sous-estimant la position réelle de disparition. Pour résumer, les auteurs concluent que les erreurs de localisation dépendent fondamentalement du type de relation que l'observateur entretient avec le stimulus.

3.4 Conclusion

La poursuite oculaire est basée sur un mode de contrôle prédictif. Ce contrôle prédictif s'appuierait sur des modèles internes. Cette notion a été particulièrement développée pour décrire les processus par lesquels le système de contrôle des mouvements parvient à prendre en compte les délais associés aux systèmes sensoriels (Wolpert & Kawato, 1998 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Parmi les structures nerveuses capables d'organiser de tels modèles, le cervelet est la structure la plus souvent citée. L'organisation spatiale et les propriétés temporelles des neurones de cette région, les connexions que le cervelet entretient directement, et indirectement (par l'intermédiaire des ganglions de la base) avec le cerveau, et le rôle du cervelet dans l'apprentissage de séquences motrices, sont les arguments les plus cités pour appuyer ce point de vue (Wolpert, Miall & Kawato, 1998). Nous y reviendrons dans le chapitre consacré au tempo moteur spontané et au tempo préféré. Quoi qu'il en soit pour l'instant, retenons que lorsque les caractéristiques du mouvement de la cible sont différentes de ce qui est naturellement observé et produit, la performance des sujets se détériore. Les modèles internes permettant la programmation du mouvement de poursuite reflètent donc certaines des régularités observées lors de l'exécution d'actions. Le point crucial est que ces modèles internes semblent jouer un rôle dans l'activité perceptive, comme le suggère le phénomène d'inertie représentationnelle (Freyd & Finke, 1984). Le fait que ce que nous voyons dépend plus de ces modèles que de la réalité physique suggère que l'activité perceptive se construit par leurs intermédiaires sur les données sensorielles. Il est donc fort probable que dans d'autres tâches perceptives, les réponses des sujets reflètent fondamentalement leurs influences.

4. RESUME

Les informations visuelles convergent plus ou moins directement, par l'intermédiaire de voies corticales et sous-corticales, vers des aires motrices. Les caractéristiques fonctionnelles des neurones des aires pariétales, temporales et frontales suggèrent une sensibilité à une catégorie de mouvements particuliers : les mouvements biologiquement plausibles. L'analyse des propriétés des neurones de l'aire MT, étendue aux territoires environnants, suggère que cette zone temporelle moyenne, associée à la voie dorsale, est une zone d'intégration essentielle des informations concernant les déplacements dans le réseau optique ambiant. Un grand nombre de neurones de MT ont une réponse qui traduit une réelle sensibilité à la vitesse. La majeure partie des vitesses de référence est concentrée entre 4 et 20 °/s. La vitesse moyenne de référence de la population testée varie entre 22 et 32 °/s. Les seuils de détection pour les vitesses est de l'ordre de 5-8 %. La réponse de plusieurs neurones pourrait être combinée mais les mécanismes d'intégration des réponses au-delà de MT restent imprécis. Quels que soient les mécanismes envisagés, de nombreux travaux indiquent que l'activité de cette aire contribue aux décisions perceptives, et au contrôle des mouvements de poursuites. Ces derniers activent un grand nombre de territoires et leur contrôle s'appuierait sur une base de connaissances *a priori* des caractéristiques du système effecteur et du monde physique. Nous allons voir dans le chapitre qui suit que ces connaissances concernent tout particulièrement les mouvements biologiques.

II. LA PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS "BIOLOGIQUES"

L'expression « mouvement biologique » fut proposée par G. Johansson (1973) pour qualifier les stimuli visuels que des sujets adultes devaient reconnaître dans une expérience devenue classique. La technique mise au point consistait à placer des points lumineux sur la tête et les principales articulations d'un acteur habillé en noir, puis à filmer cet acteur dans l'obscurité pendant qu'il réalisait diverses activités physiques mettant en jeu l'ensemble du corps (marche, course, danse, bicyclette). L'effet produit par ces films — des séquences de quelques dizaines de secondes figurant le « mouvement biologique » de onze points lumineux — est décrit par Johansson (1973) comme « immédiat et irrésistible⁹ ». Les étudiants auxquels on présentait ces séquences reconnaissaient rapidement et sans ambiguïté les activités filmées et, plus généralement, décrivaient le nuage de points comme représentant un humain en mouvement. En revanche, les sujets ne reconnaissaient jamais les stimuli lorsqu'une image extraite du film leur était présentée statiquement. D'autres descriptions, comme « nuage d'étoiles », ou « arbre de Noël dans la nuit », remplaçaient alors la perception systématique d'une action humaine. Par la suite, la capacité des sujets à saisir l'action dans le mouvement des points qui la représente fut particulièrement étudiée. De très nombreux travaux ont, depuis, analysé et précisé les caractéristiques de la perception des mouvements biologiques. Nous allons résumer ces premiers travaux, avant de centrer notre étude sur le rôle des indices cinématiques et dynamiques dans la reconnaissance des mouvements humains.

⁹ Traduit de l'anglais « immediate and compelling » (Johansson, 1973).

1. LA RECONNAISSANCE DES ACTIONS

Dans les années qui suivirent l'expérience princeps de Johansson (1973), l'application de sa technique aux mouvements du visage (Bassili, 1978) puis des mains (Poizner, Bellugi & Lutes-Driscoll, 1981) permit de généraliser ses résultats aux expressions faciales et au langage des signes. Comme une extension de cette capacité à reconnaître le mouvement biologique, les sujets adultes se révélèrent également capables de deviner le sexe du marcheur (Kozlowski & Cutting, 1977) ou encore, d'extraire du mouvement les propriétés physiques d'objets impliqués dans l'action. Observer le soulèvement d'une caisse (marquée par 8 points lumineux) permet, par exemple, d'estimer son poids (Runeson & Frykholm, 1981). Ou encore, observer le soulèvement et le lancé de sacs, qui ne sont pas figurés par des points lumineux, permet d'indiquer la distance à laquelle le lanceur projette le sac (Runeson & Frykholm, 1983). En fait, les mouvements perçus permettent de saisir des propriétés « cachées » de l'action : celles relatives aux objets utilisés. L'action perçue est incarnée : elle s'inscrit dans un contexte qui obéit à des lois.

La sensibilité au mouvement biologique n'est pas limitée au mouvement humain. Mather & West (1993) ont montré, par exemple, que les sujets adultes sont capables de reconnaître différents quadrupèdes (élan, babouin, chameau). Dans une expérience plus récente (Pavlova, Krägeloh-Mann, Sokolov & Birbaumer, 2001) des résultats similaires ont été obtenus pour le mouvement d'un oiseau en vol ou d'un chien marchant ou courant. En fait, la capacité à reconnaître notre environnement par la forme de ses changements (son mouvement) va bien au-delà des seules catégories biologiques auto-animées. En utilisant une technique comparable à celle de Johansson (1973) il est possible de réduire, à leurs mouvements, une multitude d'événements physiques (Bingham, Schmidt & Rosenblum, 1995). Les sujets sont capables de reconnaître l'effet du vent dans le mouvement de bouts de bandes réfléchissantes, d'identifier une balle par son rebond ou encore, les propriétés des liquides qui éclaboussent ou simplement coulent. A chaque événement correspond une dynamique particulière et les sujets sont capables de discriminer ces différentes dynamiques sur la base d'informations essentiellement cinématiques. Nous pouvons donc nous demander si le mouvement biologique n'est pas seulement une catégorie de mouvement parmi les autres. Expliquer

la perception des mouvements humains reviendrait alors à expliquer la catégorisation des mouvements en général. Toutefois, nous allons voir que la perception des mouvements biologiques possède des qualités qui la distingue de la perception des autres catégories de mouvements.

1.1 Délais de reconnaissance et discrimination

Les délais nécessaires à la reconnaissance des stimuli biologiques peuvent être extrêmement courts. La détection de la direction d'un mouvement de locomotion nécessite près de 200 *ms* (Johansson, 1976). A titre de comparaison, un délai de 150 *ms*, mesuré par une technique de *potentiels évoqués*, est considéré comme nécessaire pour observer au niveau cortical les corrélats neuronaux de la détection d'un animal dans une image (Thorpe, Fize, & Marlot, 1996). La reconnaissance dépend faiblement du nombre de points lumineux constituant le stimulus. Ce nombre peut être réduit à 4 et, dans ces conditions, les indices de forme sont quasiment inexistantes. En revanche, d'autres manipulations du stimulus peuvent augmenter les délais de traitements, voire altérer la reconnaissance des actions. Par exemple, la détection d'un mouvement de locomotion est plus difficile lorsque le marcheur est inversé, c'est-à-dire qu'il se déplace à reculons et la tête en bas. (Sumi, 1984). Par ailleurs, la présentation de points lumineux additionnels (bruit), ayants des mouvements aléatoires ou déterminés, gêne également la reconnaissance de la locomotion (Cutting, Moore & Morrison, 1988). Toutefois, le nombre de points constituant le masque (un bruit dynamique aléatoire) peut représenter plus de 100 fois le nombre de points figurant un mouvement de locomotion sans empêcher significativement la détection de ce type de stimulus (75 % de détections correctes, Neri, Morrone & Burr, 1998). Dans des conditions de présentation « bruitées », il faut près de 800 *ms* pour reconnaître la direction dans laquelle se dirige un marcheur, contre 200 *ms* dans des conditions habituelles de présentation. Ce délai dépend également du nombre de cycles locomoteurs présentés dans la séquence (Neri et al, 1998). Pour les adultes mais aussi les enfants, les stimuli masqués ne sont généralement pas reconnus lorsqu'ils sont présentés à l'envers (Bertenthal, Proffitt & Cutting, 1984). Ce dernier résultat souligne un effet cumulatif des différentes altérations de la situation originale de Johansson (1973). Finalement, et plus généralement, il apparaît que perturber l'organisation spatio-temporelle du nuage de points affecte

sensiblement l'impression donnée à l'observateur (Grossman & Blake, 1999). Ces animations déphasées, où le bruit est appliqué au niveau du mouvement relatif des points, sont facilement discriminées des séquences naturelles. Dans ces stimuli, le mouvement relatif des points est manipulé sans que le mouvement absolu de chaque point ne soit modifié. Les mouvements des points — relativement à leur position de départ — sont les mêmes que dans l'original, mais la position de départ de chaque point sur l'écran est aléatoire. Les mouvements relatifs des points les uns par rapport aux autres n'ont donc plus rien en commun avec ceux du marcheur original.

Les effets perceptifs associés aux modifications de la structure spatio-temporelle du stimulus de Johansson ont récemment fait l'objet d'une expérience originale (Gièse & Lappe, 2003). Les auteurs construisent des mouvements hybrides, mélangeant par exemple la marche et la course ou des mouvements très différents comme marcher et s'agenouiller. Le poids accordé aux prototypes (les mouvements originaux) dans les mouvements hybrides est varié (0 ; 0.2 ; 0.4 ; 0.6 et 0.8). La tâche consiste dans un premier temps à identifier le mouvement présenté, puis à noter (sur une échelle de 1 à 9) l'aspect naturel du mouvement avant de préciser les vitesses minimums et maximums pour lesquelles le mouvement conserve cet aspect naturel. Les résultats indiquent que les sujets se révèlent capables de catégoriser les différents mouvements, et ce, même lorsque les combinaisons sont ambiguës (c'est-à-dire lorsque les poids respectifs des prototypes dans le modèle sont proches, par exemple 0.4 pour la marche et 0.6 pour marcher en boitant). Le résultat qui est le plus intéressant, pour notre recherche, concerne les jugements de vitesses. Les auteurs suivent le raisonnement suivant : puisque les mouvements biologiques sont typiquement associés à un ensemble de vitesses caractéristiques, il semble possible qu'une vitesse prototypique soit associée aux modèles présentés. Les résultats indiquent effectivement que les vitesses moyennes attribuées aux différentes actions (marcher, courir, boxer, boiter, s'agenouiller) sont corrélées aux vitesses mesurées lors de l'enregistrement des stimuli. Mieux, la vitesse attribuée est également corrélée au poids attribué au prototype course dans les modèles hybrides. Les propriétés temporelles attribuées au stimulus sont donc en accord avec son degré de correspondance au modèle biologique (plus le poids du prototype course dans le modèle hybride est important plus la vitesse jugée « naturelle » est grande).

1.2 Perception des mouvements humains et développement de l'enfant

Nous avons vu plus haut que les mouvements humains ne sont pas les seuls événements reconnus lorsque les indices de formes sont réduits en utilisant la technique des points lumineux. Les travaux de Bingham et collaborateurs (1995) indiquent, par exemple, que de nombreux types de mouvements physiques sont également reconnus. La reconnaissance des actions pourrait donc reposer sur un apprentissage visuel. Johansson (1975) considérait, au contraire, que l'extraction de formes biologiques à partir du mouvement reposait sur un mécanisme perceptif intrinsèque, c'est-à-dire indépendant des processus cognitifs de haut niveau et des connaissances acquises. Il postulait que ce mécanisme était « précâblé », c'est-à-dire présent dès la naissance chez l'être humain. Cette hypothèse a été testée par la suite. Bertenthal et collaborateurs, (1984) ont montré, au moyen d'une procédure d'habituation que les nouveau-nés perçoivent dès 3 mois la différence entre un stimulus de Johansson (locomotion) et le même stimulus présenté tête en bas. A partir de 5 mois, les nouveau-nés discriminent un marcheur de Johansson d'un stimulus déphasé. Il apparaît donc qu'il existe chez les très jeunes enfants une sensibilité à la cohérence des mouvements biologiques. Les nouveaux-nés humains sont capables, dès 5 mois, de détecter l'existence d'une structure biologique sous-jacente au mouvement (Bertenthal et al, 1984). Une telle précocité laisse donc penser, comme le supposait Johansson (1975), que cette compétence provient au moins en partie de l'existence d'un module fonctionnel spécialisé, faisant partie de notre héritage génétique, plutôt que d'un apprentissage perceptif. L'absence apparente chez les très jeunes enfants (en dessous de 3 mois) de sensibilité particulière aux mouvements biologiques résulterait d'une maturation nerveuse encore incomplète.

1.3 La perception des mouvements de locomotion : l'apport de l'électrophysiologie

La partie antérieure de l'aire temporale polysensorielle (STPa), contient des neurones qui répondent sélectivement à la présentation de mouvements biologiques divers, incluant la locomotion et les actions manuelles (Perret, Mistlin, Harries & Chitty, 1990). L'activité est spécifiquement reliée à la présentation visuelle d'actions effectuées par un être vivant. Un tiers environ des neurones de l'aire STPa continuent de répondre lorsque le stimulus n'est plus constitué que de 10 points lumineux (à la place

d'une représentation schématique du corps dans la condition de référence (Oram & Perrett, 1994). Ces neurones ne répondent pas à une présentation partielle de ce type de stimuli, ce qui signifie qu'ils ne détectent les mouvements que dans la mesure où il s'agit de mouvements du corps humain entier. Il est donc très probable qu'il existe au niveau de l'aire STPa des circuits cérébraux spécialisés dans l'observation des mouvements biologiques, où sont intégrées des informations de formes et de mouvements caractéristiques des organismes vivants. Mais cette aire n'est pas la seule à être activée lors de la perception de mouvements biologiques. Les aires pariétales et frontales, réciproquement, connectées semblent également prendre part au traitement des stimuli biologiques.

Récemment, des études d'électrophysiologie (enregistrement unitaire) ont montré l'existence, et détaillées les fonctions, d'une population de neurones activés lors de l'observation d'action (saisir de la nourriture avec la main ou la bouche par exemple). Fait nouveau, ces neurones sont situés au niveau de l'aire F5 (une subdivision du cortex pré-moteur des singes macaque) et ont également un rôle moteur (di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 1992 ; Gallese, Fadiga, Fogassi & Rizzolatti, 1996). L'aire F5 est réciproquement connectée à l'aire AIP (partie antérieure du sillon intra-pariétal) et à la partie inférieure du lobe pariétal (aire PF). Pour ces neurones « miroirs » de l'aire F5, l'activité mesurée est indépendante de la modalité (perception ou réalisation de l'action). Autrement dit, les neurones qui sont actifs lors de la présentation visuelle d'une action très spécifique, comme une saisie de nourriture entre le pouce et l'index, sont également actifs lors de la préparation et de l'exécution de cette même action. Que le geste soit fait par un humain ou par un autre singe ne semble pas modifier les résultats. En revanche, il est impératif que ce soit la main d'un être vivant, et non pas une pince qui saisisse la nourriture. Dans la même région, il existe une seconde population de neurones dits « canoniques ». Pour ceux-ci il est possible d'établir une correspondance entre l'observation d'objets, et la préparation et l'exécution d'actions dirigées vers ces objets. Par exemple, la présentation d'un objet de petite taille évoque une activité de neurones qui sont précisément recrutés lors de la saisie réelle de petits objets. En fait, ces deux populations de neurones ne diffèrent pas sensiblement par leur rôle moteur et montrent une extraordinaire complémentarité au niveau perceptif. Les neurones canoniques et miroirs — activés respectivement par

l'observation d'objets ou d'actions — constituent deux catégories de neurones visuo-moteurs qui pourraient jouer un rôle clef dans la représentation interne des actions. Dans un article de synthèse, Fadiga et collaborateurs (2000), proposent que la co-existence de réponses visuelles et motrices pour un même neurone pourrait signifier qu'une action particulière « vient à l'esprit¹⁰ ». L'activation de ces neurones, dont le rôle était classiquement considéré comme moteur, refléterait l'accès à une information de nature pragmatique, c'est-à-dire à une connaissance de la façon dont on agit sur les objets. Chez l'homme, les aires 44 et 45 de Broadman (la zone du gyrus frontal inférieur, incluant l'aire de Broca) sont considérées comme homologue de l'aire F5 chez le singe macaque (Grèzes & Decety, 2001).

1.4 L'apport de la neuroimagerie chez l'homme

Les techniques de neuroimagerie ont permis d'identifier de nombreuses aires associées à la perception du mouvement. Ici, il s'agit de traiter brièvement le cas particulier de l'observation des mouvements biologiques. Les résultats obtenus en utilisant l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) indiquent que la présentation d'un mouvement de locomotion (stimulus comparable à celui de Johansson, 1973) active spécifiquement une région localisée au niveau de la Scissure Temporale Supérieure (Grossman, Donnelly, Price, Morgan, Pickens, Neighbor et Blake, 2000). La présentation d'un stimulus déphasé n'active pas cette région. Dans une seconde étude utilisant la technique de l'IRMf, Grossman et Blake (2001) ajoutent une troisième condition dans laquelle le stimulus original est présenté tête en bas. Les résultats montrent que le niveau d'activation de la zone du STS dépend de l'orientation du marcheur et de l'intégrité du mouvement relatif. L'activité mesurée pour le marcheur inversé est supérieure à celle observée dans la condition la moins efficace (déphasée) mais c'est pour le mouvement correctement orienté que la meilleure réponse est obtenue. Ce résultat pourrait expliquer les délais d'identification plus importants pour le stimulus tête en bas de Sumi (1984) et l'absence de reconnaissance des mouvements déphasés (Grossman et Blake, 1999). Cette conclusion serait d'ailleurs en accord avec les résultats de l'électrophysiologie si un parallèle devait être fait entre l'aire STPa et la zone du STS.

¹⁰ Traduit de l'anglais « coming in mind », Fadiga, et al (2000), pp 176.

Dans l'étude de Oram et Perret (1994), citée dans le paragraphe précédent, les cellules activées par la présentation du stimulus de Johansson (1/3 de la population activée par la vue d'un corps schématique en mouvement) ne répondent pas à la présentation d'un stimulus déphasé.

Nous reviendrons sur les résultats des études de neuroimagerie dans la partie consacrée au mouvement imaginé. Il nous faut pour l'instant revenir sur la reconnaissance du mouvement, et plus particulièrement sur la reconnaissance de nos propres mouvements. Les études expérimentales présentées dans le paragraphe suivant testent l'hypothèse d'une meilleure reconnaissance de ses propres actions.

1.5 Perception visuelle de soi, perception visuelle d'autrui

L'expérience visuelle que nous avons des actions d'autrui est plus grande que celle que nous avons de nos propres actions. Nous voyons nos congénères marcher dans différentes directions, sous différents angles et, la plupart du temps, les mouvements du corps entier sont accessibles. En revanche, l'expérience que nous avons de nos propres mouvements est essentiellement kinesthésique. A moins de marcher devant une glace ou de s'observer sur un film, la perception que nous avons de nos propres mouvements est souvent limitée à une partie du corps. Si la reconnaissance des actions est basée sur un apprentissage visuel, nous devrions être, au mieux — dans une situation où les indices de formes et les signes identifiables du comportement sont réduits — capables de nous reconnaître avec la même efficacité qu'autrui. En revanche, si l'expérience motrice contribue à la perception des actions, la reconnaissance de soi pourrait être facilitée. L'expérience conduite par Bearsworth et Buckner (1981) étudie précisément cette question. La méthode définie par les auteurs consiste à filmer des acteurs habillés d'une combinaison équipée de points lumineux. Les 6 acteurs/sujets se connaissaient et avaient l'occasion de se voir quotidiennement. La scène, filmée 10 fois avec chaque acteur, était clairement définie : marcher vers une chaise et s'asseoir, se relever, traverser la pièce pour saisir et déplacer un poids puis retourner à reculons vers chaise et s'asseoir de nouveau. Il était expliqué que l'expérience avait pour but de tester la capacité des sujets à deviner le poids saisi par les acteurs afin de détourner l'attention des sujets de la locomotion. Les 60 films étaient présentés dans un ordre aléatoire une semaine après l'enregistrement (cassette 1) et 2 jours après la première projection

(cassette 2). Les acteurs avaient alors pour instruction de deviner le nom de la personne présente sur le film. Le nombre de jugements donnés était limité (un nom ne pouvait être donné que cinq fois). Le résultat principal concerne le pourcentage d'identification correcte de sa propre personne. Dans ce cas, près de 58 % de réponses correctes sont observées, contre 31 % pour autrui. Il semble donc que la reconnaissance de sa propre démarche soit bien meilleure que la reconnaissance de celle d'autrui. Dans la mesure où notre propre démarche n'est pas directement accessible visuellement, ce résultat suggère que l'expérience motrice contribuerait à la reconnaissance de soi. Toutefois, le fait que tous les acteurs ne parviennent pas à reconnaître avec la même précision leur propre démarche (cas extrême, le sujet 6 ne se reconnaît pas du tout) affaiblit cette conclusion. Tous les acteurs ne profitent pas de cette expérience. Les auteurs concluent qu'un processus d'identification à autrui, particulièrement influent chez les personnes dépendantes à l'égard du champ, pourrait expliquer les différences individuelles.

1.6 Conclusion

Les résultats que nous venons de rappeler indiquent que la reconnaissance des mouvements biologiques est relativement générale, rapide et précoce. Cependant, elle est perturbée si la structure spatio-temporelle du stimulus est altérée. L'interprétation qui est faite du signal visuel dépendrait donc fondamentalement du fait que les instantanés pris par la caméra préservent les caractéristiques spatiales et temporelles du mouvement biologique filmé. La reconnaissance des actions pourrait être expliquée en partie par l'activation de populations de neurones sensibles aux configurations présentant ces caractéristiques. Le cas particulier de la reconnaissance de ses propres mouvements suggère que cette activation dépendrait essentiellement d'une correspondance entre les mouvements perçus et les mouvements exécutés. Nous avons précisé, plus haut, qu'il existait des principes généraux d'exécution motrice, c'est-à-dire des régularités valables pour l'ensemble de la population. Que se passerait-il si le mouvement perçu ne contenait pas ces régularités ? Nous avons déjà vu que les sujets ont des difficultés à reconnaître les stimuli de Johansson déphasés (Grossman et Blake, 1999). Nous allons voir, maintenant, que les mouvements humains possèdent une signature particulière à laquelle la perception est, en quelque sorte, accordée.

2. PERCEPTION VISUELLE DES MOUVEMENTS ET LOI MOTRICE : L'EXEMPLE DE L'ELLIPSE

Jusqu'à présent nous nous sommes essentiellement intéressés à la perception visuelle de stimuli composés d'un ensemble de points. Dans ces stimuli, l'information locale (le mouvement d'un point) se confond avec l'information globale (le mouvement de l'ensemble des points) de telle sorte qu'il est difficile d'identifier le rôle respectif de ces deux éléments dans le processus de reconnaissance. Les études présentées maintenant analysent les caractéristiques de la perception du mouvement biologique d'un seul point. Ce point peut, par exemple, être associé au mouvement de l'extrémité du doigt de quelqu'un qui dessine des formes particulières. Nous allons voir que l'exécution des séquences motrices peut révéler, en plus des différences individuelles, des régularités qui caractérisent le mouvement biologique, c'est-à-dire des principes qui sont le signe de la nature biologique du système dont résulte le mouvement. Ces principes refléteraient l'influence de contraintes fonctionnelles propres au système et non seulement à l'individu.

2.1 La loi de la puissance 2/3 : une loi motrice

L'étude des mouvements de traçage et d'écriture révèle une relation entre la vitesse de la pointe du stylo et la courbure des mouvements (Viviani & Terzuolo, 1982). Pour les mouvements humains, la forme de la trajectoire et la cinématique ne sont pas indépendantes mais liées par une loi de puissance. Sous sa forme la plus récente (Viviani, 2002) cette loi est formalisée comme suit : $V(t) = [K(t)/(1 + \alpha R(t))]^{1-\beta}$ où $V(t)$ représente la vitesse instantanée et $R(t)$ le rayon de courbure à l'instant t . Le paramètre K représente le gain de vitesse (propre à chaque sujet et constant pour de larges portions de trajectoire), α est compris entre 0 et 0.1, et l'exposant β est une constante dont la valeur est proche de 2/3. Les mouvements plans, périodiques ou apériodiques, simples ou complexes présentent cette régularité (Viviani, 1994). La loi indique que la vitesse instantanée d'un mouvement inversement liée à sa courbure. Le cas de l'ellipse illustre particulièrement bien cette loi. En effet, la courbure de cette forme géométrique varie entre deux extrêmes correspondant aux points où la trajectoire rencontre les axes de symétrie (x, y) de cette conique à centre. La courbure est maximale sur l'axe x et

minimale sur l'axe y . Les profils de vitesse tangentielle des mouvements de tracés d'ellipses ressemblent à une fonction sinus, oscillant entre deux extrêmes. La vitesse est maximale dans les parties les plus planes, et minimale dans les zones de forte courbure. Les situations où le rayon de courbure est nul apparaissent comme une limitation à la généralisation de la loi de puissance $2/3$. Le paramètre α permet justement de tenir compte de ce cas particulier. Si $R(t)$ est nul α prend la valeur 0.1 afin d'éviter que $V(t)$ ne soit prédite comme infiniment grande. Cette loi est déjà en place à l'âge de 6 ans quoique la valeur de l'exposant β soit sensiblement plus élevée chez les jeunes enfants (Viviani et Schneider, 1991). La loi de puissance $2/3$ a été généralisée aux mouvements dans l'espace (Soechting & Terzuolo, 1986).

La loi de la puissance $2/3$ prédit que les vitesses instantanées des mouvements, et donc leurs durées, dépendent du gain de vitesse K (constant pour de larges portions de trajectoire) et de l'exposant β (une constante). Pour des tracés de lettres ou d'ellipses de tailles différentes ce principe prédit des vitesses moyennes du mouvement différentes. Plus la courbure moyenne de la trajectoire du mouvement est faible, plus la vitesse moyenne du mouvement est importante. Ce type de relation semble assimilable au principe d'isochronie décrit par Binet et Courtier (1893). Toutefois, ce principe — qui indique que la durée d'exécution d'un mouvement est faiblement (moins que proportionnellement) dépendante de la longueur de la trajectoire — conserve un statut à part. En effet, il n'est pas entièrement expliqué par l'augmentation de la vitesse liée à la diminution de la courbure moyenne du mouvement. Viviani et Schneider (1991) distinguent dans ce phénomène deux composantes additives. La première dépend de la courbure moyenne (comme indiqué ci-dessus) et la seconde du gain de vitesse K . Pour une raison inconnue K dépend de la longueur de la trajectoire du mouvement. Les auteurs précisent également que la valeur de K est une fonction de puissance du périmètre des ellipses tracées (P). Au niveau de cette seconde composante, une distinction entre aspects locaux et globaux de la modulation de K par P est nécessaire lorsque les mouvements considérés sont des formes géométriques plus complexe que l'ellipse (limaçon de pascal : Viviani & Flash, 1995). Dans ce cas, la valeur de K peut dépendre (en fonction de la vitesse moyenne d'exécution) à la fois de la longueur de l'unité d'action (une sous partie de la figure) et de la longueur totale de la trajectoire.

2.2 La loi de puissance 2/3 et le codage de la direction des mouvements du bras

De nombreux modèles heuristiques de la formation des trajectoires ont été développés à partir d'intuitions concernant des contraintes optimisées par le système moteur. C'est le cas par exemple pour les modèles qui minimisent les variations des moments de torsion (Uno, Kawato & Suzuki, 1989), les secousses¹¹ (Flash & Hogan, 1985; Viviani & Flash, 1995) ou la variabilité spatiale de la position finale (Harris & Wolpert, 1998). Dans ces modèles, la loi de puissance 2/3 est une conséquence de l'optimisation de quantités, respectivement dynamiques et géométriques.

La question de l'origine de la loi de puissance 2/3 a été abordée, plus directement, en étudiant les caractéristiques fonctionnelles des neurones associés à l'exécution des mouvements. Depuis les travaux de Georgopoulos (1991), sur le singe macaque, il est établi que la direction et la force des mouvements de pointage dépendent de large population de neurones de l'aire motrice primaire. Les réponses de ces neurones révèlent une préférence directionnelle. La réponse est maximale pour les mouvements dans une direction donnée (vecteur du neurone) et décroît rapidement lorsque le mouvement s'éloigne de la direction préférentielle. La population de neurones activés par un mouvement dans une direction donnée peut donc être décrite par un ensemble de vecteurs différemment orientés. La longueur de ces vecteurs peut être pondérée, en fonction de l'écart angulaire entre la direction requise et la direction des vecteurs. Lorsque la somme de ces vecteurs pondérés est calculée, le vecteur résultant (vecteur populationnel) permet de prédire la direction du mouvement près de 170 ms avant qu'une activité musculaire soit détectée.

Les changements de direction nécessaires à l'exécution de courbes impliquent une rotation du vecteur de la population recrutée. Les neurones ayant une préférence directionnelle, de nouvelles cellules, dont les caractéristiques sont compatibles avec la nouvelle direction requise pour le mouvement, doivent être recrutées (c'est-à-dire, incluses dans la population codant pour la direction du mouvement). Plus le changement de direction est important (plus la courbure est grande) plus la proportion de la population de neurones devant être remplacée est grande. Schwartz (1994) a montré que

¹¹ Traduit de l'anglais Jerk, les secousses représentent les variations d'accélération.

chez des singes exécutant des mouvements de tracé en 2-D, la rotation du vecteur de la population considérée obéissait à la loi de puissance deux tiers. L'auteur conclut que la relation entre les aspects figuratifs et cinématiques du mouvement est également présente chez les singes, et que cette loi est déjà représentée dans l'activité du cortex moteur. La préférence directionnelle et le codage populationnel n'est pas une propriété exclusive des neurones du cortex moteur primaire. Un type de codage similaire a été mis en évidence au niveau du cortex pré-moteur (Caminiti, Johnson & Urbano, 1990), du cortex pariétal postérieur (Kalaska, 1988), du cervelet (Fortier, Kalaska & Smith, 1989) du cortex somatosensoriel primaire et des ganglions de la base.

2.3 Qu'est ce qu'une vitesse uniforme ?

Les mouvements humains de traçage et d'écriture sont caractérisés par une relation spécifique entre vitesse et courbure. La loi de puissance capture donc l'essence du mouvement biologique lorsque ce dernier est résumé à la trajectoire de la partie terminale du segment utilisé (la main, le doigt ou, par extension, le stylo tenu dans la main). D'un point de vue physique, la vitesse du mouvement d'un point matériel est uniforme si l'espace parcouru est proportionnel au temps. D'un point de vue perceptif, en revanche, les résultats d'une expérience de Viviani et Stucchi, (1992a) indiquent que la vitesse du mouvement d'un point est considérée comme uniforme si la relation entre la vitesse instantanée et le rayon courbure respecte la loi de puissance 2/3. Rappelons que dans ce cas, les variations de vitesse le long de la trajectoire sont importantes.

Dans l'expérience de Viviani et Stucchi, (1992a), les sujets observent un point lumineux dont la trajectoire est elliptique ou pseudo-aléatoire. Le dispositif permet aux sujets d'ajuster, par l'intermédiaire du clavier, la valeur de l'exposant β (de -0.25 à 0.66 par pas de 0.083). Il faut préciser que la relation entre vitesse et courbure peut également être écrite sous la forme $V(t) = K[R(t)/(1 + \alpha R(t))]^\beta$ (Viviani & Stucchi, 1992a). Dans ce cas la valeur calculée de l'exposant β est proche de 1/3. Le nom de « loi de puissance 2/3 » est cependant préféré en référence à la première formulation de cette relation : $A(t) = KC(t)^\beta$, (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983) dans laquelle $A(t)$ désigne la vitesse angulaire à l'instant t , et C , la courbure ($1/R$). Dans l'équation utilisée par Viviani et Stucchi, (1992a) la valeur de β correspondant à la situation biologique est

1/3. La vitesse du point est constante lorsque $\beta = 0$. La consigne donnée aux sujets précise que ces derniers doivent ajuster la vitesse du point et choisir la vitesse qui leur paraît la plus uniforme. L'analyse des résultats montre que les réponses convergent invariablement vers la valeur $\beta = 1/3$. Les sujets considèrent comme uniforme une vitesse pouvant varier de près de 200 % le long de la trajectoire. Enfin, lorsque des exemples d'ellipses tracées à vitesse constante sont donnés et que les sujets sont explicitement invités à fournir une réponse équivalente, les valeurs choisies sont, malgré tout, proches de la valeur $\beta = 1/3$ (expérience 3 : Viviani et Stucchi, 1992a). Les auteurs concluent que, pour des raisons qui restent à préciser, la perception d'une vitesse uniforme correspond à la perception d'une vitesse qui varie en conformité avec les principes qui régissent les mouvements biologiques. Au contraire, les profils de vitesse constants induisent des impressions d'accélération et de décélération (Viviani & Stucchi, 1992a, Runeson, 1974).

2.4 Loi de puissance 2/3 et illusions géométriques

Le fait que les sujets de l'expérience précédente jugent, à tort, que les mouvements dont la vitesse instantanée co-varie avec le rayon courbure sont les plus uniformes, constitue un cas particulier d'illusion dynamique. Cet exemple est cité à part car il indique une relation directe entre la motricité humaine et l'expérience sensible. C'est ce type de relation qui est précisément l'objet de cette thèse. Les travaux concernant la loi de puissance 2/3 indiquent également un rôle de cette constante cinématique pour la perception de la forme des trajectoires de stimuli dynamique.

Viviani & Stucchi (1989), ont mis en évidence une illusion dynamique qui est en partie expliquée par la loi de puissance deux tiers. Dans cette expérience, un point lumineux se déplace le long d'une trajectoire elliptique dont l'orientation peut être verticale ou horizontale (excentricité, $\Sigma = 0.7$). La période de révolution est fixée à 0.6 s, le périmètre présenté est estimé à 13.2 cm et 10 cycles sont présentés avant que le sujet ne donne sa réponse. La tâche consiste à identifier l'orientation de l'ellipse (verticale, horizontale). A chaque réponse correcte, l'excentricité de l'ellipse est réduite de 0.05. L'expérience se termine lorsque les réponses du sujet se sont inversées 10 fois, c'est-à-dire lorsque ce dernier oscille entre des valeurs d'excentricités pour lesquelles il éprouve des difficultés à estimer l'orientation de l'ellipse (idéalement, $\Sigma = 0$). Les

auteurs estiment, par la moyenne et l'écart type de la valeur des points d'inversion, l'erreur constante (EC) et le point d'égalisation subjective (PSE) correspondant à la perception de la circularité. Le facteur clef de cette expérience est la distribution de la vitesse instantanée du point le long des trajectoires présentées. Il s'agissait soit d'une distribution spécifiée par la loi de puissance $2/3$ pour une ellipse ($\Sigma = 0.9$) orientée horizontalement, soit de cette même distribution mais pour une ellipse orientée verticalement, soit d'une distribution constante (cas où $\beta = 0$, toujours avec $\Sigma = 0.9$). Il est notable que les stimuli ainsi construits ne sont pas biologiques, sauf, en théorie, le profil de vitesse contrôle ($\beta = 0$) dans le cas particulier où l'excentricité de l'ellipse présentée est nulle. Si la perception de la forme de la trajectoire est indépendante de la cinématique présentée les valeurs de CE et PSE devraient être indépendantes du facteur modulation de la vitesse. Les résultats indiquent, au contraire, que les profils de vitesse présentés induisent des distorsions systématiques de la forme perçue. Ces distorsions sont minimales dans la condition de vitesse constante. Dans les conditions où la vitesse est modulée comme s'il s'agissait du tracé d'une ellipse ($\Sigma = 0.9$) orientée horizontalement le cercle perçu subjectivement est étiré le long de l'axe x (verticalement écrasé). L'inverse est observé dans la condition où la vitesse est modulée comme s'il s'agissait du tracé d'une ellipse ($\Sigma = 0.9$) orientée verticalement, quoique l'effet soit moins marqué. Deux types de distorsions sont distingués par les auteurs. D'abord, la simple présence de mouvement produit, pour quasiment tous les sujets, une perception de la circularité moins précise que dans des conditions statiques. Ensuite, la loi du mouvement présenté produit systématiquement une variation de l'erreur d'estimation. Ces deux phénomènes interagiraient.

2.5 Conclusion

Les mouvements humains ont des caractéristiques dynamiques qui reflètent les solutions de contrôle du mouvement, sélectionnées par l'évolution parce que non-défavorables¹². Les solutions adoptées impliquent que la vitesse et la courbure des mouvements d'écriture et de traçage sont liées par une loi de puissance. Les caractéristiques fonctionnelles des neurones du cortex moteur primaire indiquent que cette loi pourrait être une conséquence de la forme de codage (populationnel) de la direction et de la force des mouvements.

La valeur de l'exposant $\beta = 1/3$ représente une signature motrice caractéristique des mouvements humains et il s'avère que la perception visuelle de ce type de mouvement est extrêmement sensible à cette régularité cinématique. La perception d'une vitesse uniforme, c'est-à-dire l'expérience subjective de l'uniformité, est fondée sur une préférence perceptive pour les mouvements obéissant à la loi de la puissance $2/3$. Cette loi influence également la perception de la forme des trajectoires des stimuli dynamique (Viviani & Stucchi, 1989). Ces deux aspects sont des plus importants pour la suite de notre recherche. Il faut toutefois rappeler que la valeur de l'exposant β de la loi de puissance $2/3$ est un facteur déterminant l'estimation de la circularité dans la modalité kinesthésique (Viviani, Baud-Bovy & Redolfi, 1997), ainsi que la précision de la poursuite visuo-manuelle (Viviani, Campadelli & Mounoud, 1987) ou oculaire (de'Sperati & Viviani, 1997). Enfin, lorsque la relation vitesse/courbure de 13 points lumineux figurant le mouvement de lancer typique d'un joueur de pétanque est manipulée — de la même façon que dans l'expérience de Viviani et Stucchi (1992a) — les sujets considèrent comme plus naturel les gestes de lancer respectant la loi de puissance $2/3$ (Viviani & Stucchi, 1992b).

Le cadre théorique développé autour de ces phénomènes de compatibilité dynamique (ce qui est biologique laisse une impression d'uniformité, est mieux identifié et poursuivi) postule que la perception des événements dynamiques est le résultat d'interactions entre l'information sensorielle et les compétences motrices. Pour reprendre les termes de Viviani, (2002) : « la façon dont le corps humain se déplace constitue un cadre de référence pour la représentation des événements dynamiques ».

¹² Nous faisons référence à la théorie neutraliste de l'évolution moléculaire développée par Kimura, (1980).

3. ANTICIPATION MOTRICE ET ANTICIPATION PERCEPTIVE

Dans la dernière partie du chapitre précédent nous avons souligné le rôle des modèles internes dans le contrôle des mouvements de poursuite. Nous avons vu que ces modèles permettaient d'anticiper sur la position de la cible de telle sorte que le système de contrôle ne soit pas totalement dépendant des délais inhérents aux systèmes sensoriels. Cette capacité d'anticipation se manifeste également lors de l'exécution de mouvements pour lesquels des séquences peuvent être identifiées (écriture, parole, dactylographie). L'analyse des caractéristiques cinématiques de ces mouvements indique que le système moteur anticipe, lors de l'exécution d'une composante, les contraintes associées à la réalisation de la composante suivante. Nous allons voir, après une rapide présentation du phénomène d'anticipation motrice, que l'étude de la perception visuelle des mouvements séquentiels de phonation, d'écriture, de saisie et de pointage révèle, quant à elle, un phénomène d'anticipation perceptive.

3.1 L'anticipation motrice

L'étude de la production de la parole a permis de montrer que les mouvements des lèvres destinés à produire un son dépendent des contraintes articulatoires imposées par l'émission du son suivant (Daniloff & Moll, 1968 ; Benguérel & Cowan, 1974). Par exemple, le mouvement associé à la production du son « s » dans « si » est sensiblement différent de celui associé à la production du son « s » dans « sou ». Le mouvement des lèvres précédant l'émission du son « s » porte la marque de l'anticipation, par le système assurant la phonation, des contraintes labiales imposées par la prononciation des sons finaux. Dans le cas précis de la parole, le terme « co-articulation » est employé pour désigner cette capacité d'anticipation. Toutefois, comme un phénomène comparable est observé pour la dactylographie (Rumelhart et Norman, 1982), l'écriture (Thomassen & Schomaker, 1986 ; van Galen, Muelenbroek & Hylkema, 1986) ou les mouvements de saisie et de pointage (Louis-Dam, Orliaguet & Coello, 2000), l'expression « anticipation motrice » est employée de manière plus générale. Pour la résumer, l'anticipation motrice désigne les variations spatiales et/ou temporelles observées pour une même unité d'action lorsqu'elle est associée à d'autres.

Dans le domaine de l'écriture cursive les travaux de Orliaguet et Boë (1990) montrent que la forme et la cinématique de la première lettre des digrammes « ll », « le » et « ln », reflètent la contrainte spatiale imposée par l'enchaînement du « l », du « e » et du « n ». Le premier digramme représente une situation de contrôle, le second teste l'effet d'un changement de taille et le troisième celui de l'inversion du sens de rotation. Ces deux contraintes influencent la durée d'exécution de la partie descendante du « l » (du point le plus courbe du sommet au point le plus courbe du pied). La durée de cette unité d'action est plus importante dans la condition « inversion » que dans la condition « taille » et elle est minimale pour la situation de contrôle. La durée de la partie ascendante ne varie pas. Finalement, la forme de la lettre est sensiblement différente dans les trois conditions. Les variations concernent l'orientation de la lettre et la courbure de sa partie inférieure.

Ce phénomène s'illustre dans le cas de mouvements séquentiels, où l'on associe une première composante (la saisie d'un objet) à une seconde (son transport vers un emplacement défini par des cercles de diamètres différents). Bien que la première composante soit similaire, en terme de direction et d'amplitude, la durée de la saisie dépend de la taille de la cible, qui est le but du second mouvement (Louis-Dam et al, 2000). Plus cette cible est large, plus la saisie de l'objet qui précède la phase de transport vers la cible est rapide. Ces résultats indiquent que la saisie d'un objet n'est pas exécutée indépendamment des contraintes déterminant la phase de transport. La cinématique de la première composante porte la marque de la seconde.

3.2 L'anticipation perceptive

Alors que les processus réglant cette co-articulation des unités d'action restent à définir, il apparaît que le système visuel est sensible à ces subtiles variations. Des résultats montrent en effet que des sujets sont capables de prédire l'identité de la seconde composante d'un mouvement séquentiel si la première composante leur est visuellement présentée. C'est le cas par exemple lorsque des sujets observent, sur un écran, un point mobile représentant le mouvement de la pointe d'un stylo écrivant le premier « l » des digrammes décrit précédemment. Après la présentation, les sujets doivent deviner si ce « l » correspond à l'écriture de « ll », « le » ou « ln ». Bien que les sujets déclarent n'avoir pas été en mesure de prédire, les résultats indiquent des

performances supérieures au hasard (70 - 80 % de réponses correctes selon les digrammes, Orliaguet, Kandel & Boë, 1997). Les indices de forme améliorent la performance des sujets mais l'anticipation perceptive persiste lorsque ces derniers sont normalisés (65 - 70 % de réponses correctes). C'est dans une condition de présentation statique des formes que les performances sont les plus faibles (40 - 50 %). Des résultats similaires ont été obtenus pour des mouvements de saisie (Louis-Dam et al, 2000).

Dans le cas de l'écriture cursive, une expérience utilisant les digrammes précédents indique que l'observation de 75 % de la trajectoire de la partie descendante suffit pour voir apparaître l'anticipation perceptive (Kandel, Orliaguet & Boë, 2000). Une étude complémentaire confirme que la cinématique du mouvement est l'élément déterminant cette compétence perceptive particulière. Nous avons vu que la loi de puissance $2/3$ s'appliquait aux mouvements de traçage et d'écriture (Viviani & Terzuolo, 1982). Lorsque la relation vitesse/courbure des mouvements d'écriture présentés est modulée par l'intermédiaire de la valeur de l'exposant β , les performances diminuent au fur et à mesure de l'éloignement de la valeur biologique de $1/3$ (Kandel, Orliaguet & Viviani, 2000). L'anticipation perceptive devient très vite impossible lorsque la valeur de l'exposant β des mouvements présentés s'écarte trop du modèle biologique. Ce résultat permet de dissocier le rôle des indices temporels (différence de durées des deux phases descendantes) du rôle des indices cinématiques (variations de la vitesse du point). Dans les stimuli modifiés les indices temporels sont encore présents. Il semble donc que c'est la modulation caractéristique du profil de vitesse qui permet d'extraire l'information nécessaire à l'anticipation perceptive.

3.3 Conclusion

L'analyse des caractéristiques cinématiques des mouvements dits séquentiels indique que le système moteur anticipe, lors de l'exécution d'une composante, les contraintes associées à la réalisation de la composante suivante. La complexité de ces coarticulations empêche toute tentative de classification exhaustive. Nous dirons, par défaut, que l'anticipation motrice reflète une dynamique propre aux modèles internes utilisés par le système de planification/production des mouvements. Bien que les processus réglant cette co-articulation des unités d'action restent à définir, le système visuel saisit ces subtiles variations. Elles favorisent l'émission de réponses correctes dans des situations où les sujets doivent prédire le futur d'une action. Ce phénomène d'anticipation perceptive semble difficile à expliquer sans faire référence aux processus définissant comment les unités d'actions sont composées entre elles par le système moteur. Dans la mesure où des indices cinématiques permettent la reconnaissance des actions, il est tentant de supposer que cette reconnaissance implique l'activation de structures nerveuses mises en jeu dans l'élaboration de cette action. Ainsi, l'anticipation perceptive serait la conséquence d'activation de structures engagées dans l'anticipation motrice. C'est-à-dire, d'aires motrices participant à la planification des mouvements.

4. MOUVEMENT APPARENT ET CONTRAINTES BIOMECHANQUES

D'un point de vue physique, les mouvements sont continus. Il s'avère, cependant, que ce caractère n'est pas nécessaire à la perception d'un mouvement continu. Au cinéma, par exemple, ce qui est présenté est une succession rapide d'instantanés du mouvement, de coupes immobiles dans le mouvement. La transformation de cette succession d'instantanés en une impression de mouvement continu est assurée par le système visuel. Ce phénomène de mouvement apparent¹³ dépend fondamentalement du délai séparant les images. Nous n'avons pas abordé cet aspect dans la partie concernant l'analyse du mouvement afin d'éviter qu'un amalgame ne soit fait entre mouvement apparent, et traitement du mouvement. Ce phénomène montre en effet que la perception du mouvement peut résulter d'un processus d'intégration de vues discrètes. Toutefois, il serait faux d'inférer que la perception du mouvement consiste à intégrer une succession de vues discrètes simplement parce qu'il est possible de percevoir un mouvement lorsqu'une telle succession est présentée.

Alors que les études utilisant des objets montrent que la trajectoire perçue emprunte généralement le plus court chemin, nous allons voir que d'autres solutions peuvent être perçues par les sujets lorsque les configurations présentées mettent en jeu le corps humain.

4.1 Mouvement apparent et contraintes biomécaniques

Le phénomène de mouvement apparent offre l'occasion de tester l'influence des contraintes motrices sur les processus perceptifs. Dans une expérience originale, Shiffrar et Freyd (1990) étudient la perception du mouvement apparent de l'avant-bras dans une situation où deux photographies d'un corps (figure 4) sont successivement présentées avec un intervalle inter-stimulus (IIS) variable (de 100 à 750 ms). Cette présentation donne généralement lieu à un phénomène de mouvement apparent du bras.

¹³ Lors de l'illusion de mouvement apparent, une image est présentée séquentiellement à deux emplacements distincts, en observant un délai variable (éventuellement nul) entre la disparition de l'image du premier emplacement et son apparition au second. L'observateur a l'impression de voir un objet unique se déplacer de manière continue d'un emplacement à l'autre. De manière générale, les sujets de ces expériences voient toujours l'objet emprunter le plus court chemin d'un emplacement à l'autre (Burt & Sperling, 1981).

Les postures sont choisies de telle sorte que le bras peut emprunter deux chemins mais, des deux chemins, seul le plus long est physiquement (biomécaniquement) réalisable. Pour les IIS les plus brefs ($< 200\text{ ms}$) c'est le chemin le plus court qui est perçu le plus fréquemment. En revanche, lorsque l'IIS est augmenté, le chemin le plus long devient de plus en plus fréquemment perçu. Un plateau apparaît lorsque l'IIS atteint les 550 ms . Pour ce délai, et au-delà, le mouvement biologiquement plausible est perçu en moyenne dans 60 % des cas. Il faut rappeler que dans le cas des objets (voir figure 4), le mouvement le plus court est perçu dans plus de 80 % des cas, et ce, quelle que soit la valeur de l'IIS.

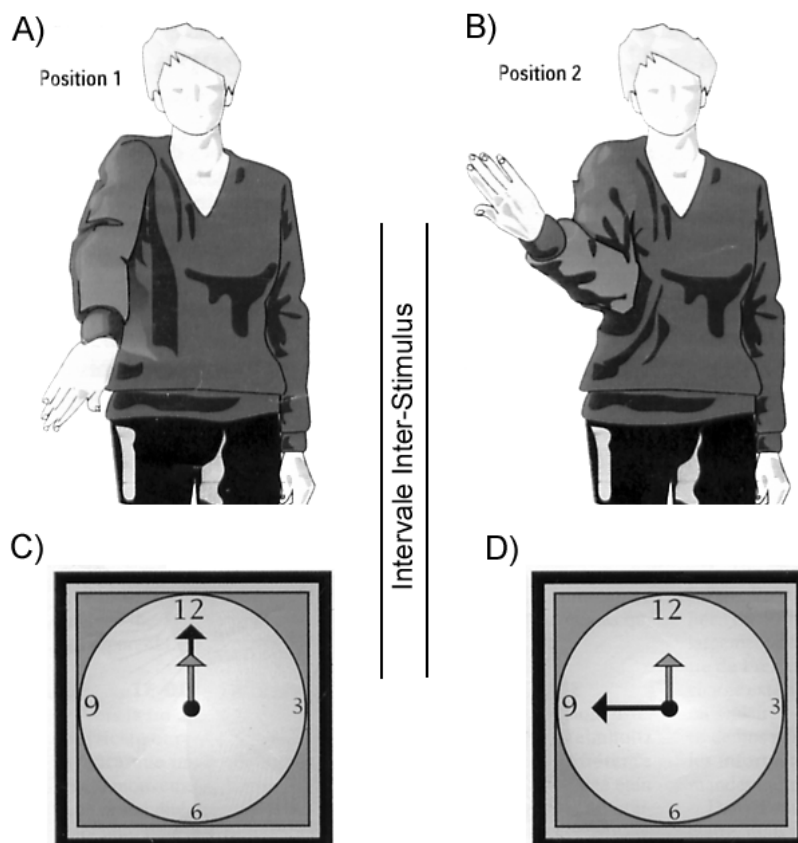


Figure 4. Représentation schématique des stimuli présentés par Shiffrar et Freyd (1990), empruntée à Viviani (1998). A et B, schémas des deux photographies utilisées dans l'expérience. Lorsque ces photographies sont successivement présentées, le mouvement apparent perçu dépend de l'intervalle inter-stimulus (voir texte). Dans une situation de contrôle (C et D) le mouvement apparent des aiguilles suit toujours le plus court chemin. Bien que les sujets sachent que les aiguilles d'une montre ne tournent pas dans ce sens, ce qui est perçu ne dépend pas de cette connaissance. C'est uniquement lorsque les stimuli impliquent le corps humain que le mouvement apparent est susceptible d'être influencé par l'intervalle inter-stimulus.

Le délai à partir duquel le mouvement biologiquement compatible est perçu n'est pas une constante. Il dépend du changement de la configuration du corps entre les deux photographies présentées. En fait ce délai semble correspondre au temps nécessaire à la réalisation d'un mouvement réel entre les deux positions présentées. Ainsi la perception du mouvement biologiquement plausible pour la large rotation de l'avant-bras (figure 4) implique un IIS plus important que la perception d'un mouvement biologiquement plausible pour de plus courtes distances (350 ms pour un mouvement autour du genou, voir section suivante). Dans une deuxième série d'expériences, Shiffrar et Freyd (1993) utilisent de nouvelles photographies. Dans ces nouvelles expériences, le plus court chemin est parfois biologiquement plausible. Les résultats montrent que ce chemin est alors perçu même lorsque l'IIS est grand. Ainsi, il est clair que les résultats précédents ne peuvent s'expliquer par une tendance à percevoir une longueur de trajectoire qui augmente avec le délai. Quand le plus court chemin ne viole pas les propriétés biomécaniques, il est toujours perçu. Lorsque les photographies présentent des changements de positions du corps relativement à des objets (par exemple, la main derrière puis devant le dossier d'un fauteuil : le plus court chemin consistant à passer la main à travers le dossier, Heptulla-Chatterjee, Freyd & Shiffrar, 1996) le mouvement perçu dépend également de l'IIS. Lorsque cet intervalle augmente, la probabilité de voir un mouvement apparent emprunter un chemin qui respecte les caractéristiques physiques du corps relativement aux objets (contourner le dossier) augmente. En revanche, lorsque le mouvement apparent concerne seulement des objets inanimés (baguettes de bois), l'augmentation de l'IIS n'entraîne pas de prise en compte par le système perceptif des contraintes de solidité.

Les travaux de Shiffrar & Freyd (1990, 1993) peuvent être considérés comme une mise en conflit de contraintes. Des contraintes de bas niveau, qui imposeraient le principe du plus court chemin, et des contraintes de haut niveau, qui imposeraient la prise en compte des propriétés des mouvements biologiques. Les résultats obtenus amènent Shiffrar (1994) à parler de « mouvement construit sur la structure¹⁴ ». La perception du mouvement apparent est, en effet, influencée par la structure des scènes présentées. Nous percevons les mouvements qui sont compatibles avec ce que nous savons des objets que nous voyons bouger. Shiffrar (1994) propose de distinguer des stimuli « simples » et « complexes ». Les stimuli simples ne feraient appel qu'à des

¹⁴ "motion from structure", Shiffrar, (1994)

contraintes de bas niveau, alors que les stimuli complexes feraient intervenir des contraintes de haut niveau, c'est-à-dire des connaissances relatives aux propriétés des objets qui sont perçus. L'effet de l'IIS indiquerait qu'un délai minimum est nécessaire pour que ces dernières viennent moduler l'effet des processus de bas niveau. L'intervention de ces contraintes demanderait du temps.

4.2 Neuro-imagerie et mouvement apparent

Lorsque des rythmes de présentation sont suffisamment lents, les sujets ont tendance à percevoir des mouvements apparents compatibles avec les propriétés du corps humain. Le temps, mesuré par l'IIS, joue un rôle important dans ce phénomène. Que se passe-t-il pendant ce délai qui pourrait expliquer la perception plus fréquente du mouvement biologiquement plausible ?

Les résultats d'une étude récente (Stevens, Fonlupt, Shiffrar et Decety, 1999) utilisant la tomographie par émission de positons (TEP) apportent quelques réponses à cette question. Les auteurs étudient le débit sanguin cérébral dans trois conditions. Dans deux d'entre elles, les stimuli présentés sont des photographies d'une personne vue debout, de profil et le pied droit posé sur une chaise. La personne est légèrement penchée en avant, son bras droit est tendu et son avant-bras se trouve soit derrière (second plan) soit devant (premier plan) son genou droit. Les deux photographies sont présentées dans cet ordre, soit pendant 400 *ms* chacune avec un IIS de 350 *ms* (condition biologiquement possible, P), soit pendant 150 *ms* chacune avec un IIS de 100 *ms* (biologiquement impossible, I). Dans une condition de contrôle, les images d'un point situé au-dessus puis en dessous d'un rectangle sont présentées successivement avec les mêmes caractéristiques temporelles que les photographies (les deux conditions de présentation de l'objet sont confondues dans une condition « objet »). Dans la condition « objet », le plus court chemin est systématiquement perçu. Pour les photographies en revanche, la perception du plus court chemin dépend de l'intervalle temporel, conformément aux résultats classiques (Shiffrar, 1993 ; Heptulla-Chatterjee et al, 1996). Dans la condition « possible » (IIS = 350 *ms*), le contournement du genou est perçu pour plus de 80 % des essais. En revanche, dans la condition « impossible » (IIS = 100 *ms*), c'est le passage du bras à travers le genou qui est perçu dans plus de 80 % des cas. L'analyse du débit sanguin cérébral indique que la perception d'un mouvement biologiquement plausible (Contraste entre la condition P et I) active bilatéralement le cortex moteur primaire, le gyrus pariétal supérieur, le gyrus frontal supérieur, le gyrus

temporal supérieur et le cervelet. L'activité métabolique est également importante au niveau du putamen, du gyrus cingulaire et du thalamus. Aucune activité n'est observée au niveau des cortex moteur et pariétal lorsque l'IIS est faible et que le plus court chemin est perçu. La perception de trajectoires possibles nécessite qu'un délai suffisant (sans doute, le délai minimum possible d'exécution) sépare les deux images. Dans cette étude, par ailleurs, les auteurs indiquent que l'activité de l'aire MT était importante par rapport au niveau de base dans les trois conditions de mouvements apparents (possible, impossible, objet). Les auteurs proposent que la perception des mouvements apparents biologiquement possible implique l'activation de structures corticales autres que les aires V1 et V2. Le gyrus pariétal supérieur et le gyrus frontal supérieur, les circuits pariéto-frontaux présentés dans la section 1.4 de ce chapitre, font partie de ces structures.

Des résultats obtenus récemment dans une expérience utilisant l'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) illustrent la contribution de MT à la perception du mouvement apparent (Seghier, Dojat, Delon-Martin, Rubin, Warnking, Segebarth & Bullier, 2000). Dans cette expérience, l'activité métabolique est enregistrée dans deux conditions (figure 5).

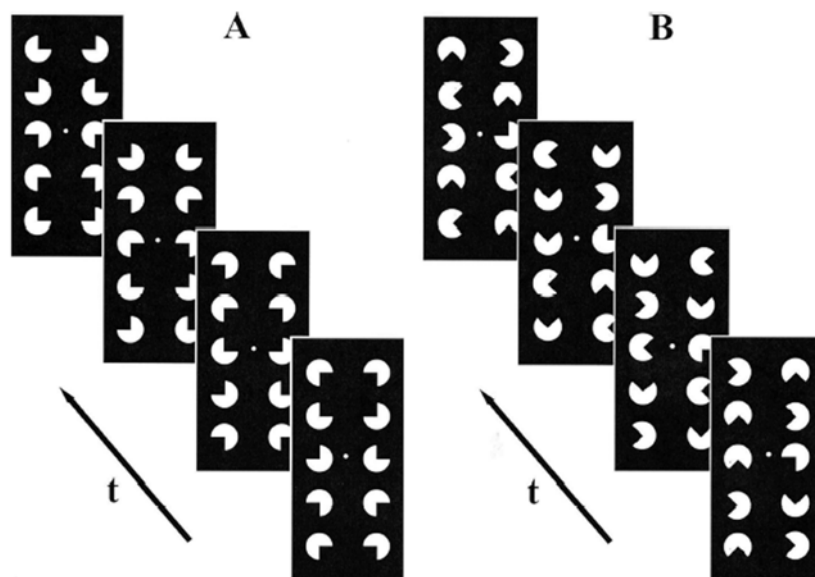


Figure 5 Stimuli utilisés dans l'expérience de Seghier et collaborateurs (2000). Le fond couvre environ $10^\circ \times 5^\circ$ d'angle visuel et un point de fixation est imposé. Quatre images sont successivement présentées au sujet. Entre chaque présentation, les 3/4 de cercles effectuent une rotation de 90° (dirigée vers l'intérieur de la figure ici). Lorsque ces rotations sont synchronisées, et ordonnées d'une certaine façon (A) les sujets perçoivent le déplacement d'une forme rectangle, dans un sens haut/bas. Dans le cas de la figure B, les rotations sont également synchronisées mais différemment ordonnées. Le rectangle n'est plus perçu et, hormis la rotation des 3/4 de cercles il n'y a pas de mouvement apparent consécutif à l'intégration de parties du stimulus dans cette seconde condition.

Mis à part le mouvement apparent du rectangle perçu uniquement lors de l'observation du stimulus A, les deux stimuli sont très similaires. La répartition des contours, et la rotation des éléments sont comparables et c'est uniquement la mise en phase des différents éléments de la figure qui détermine la perception d'un rectangle se déplaçant vers le bas (voir légende). La comparaison de l'activité métabolique enregistrée dans les deux conditions indique que l'aire MT, et, ce qui est plus surprenant, les aires V1 et V2, sont activées par le stimulus A. Selon un modèle strictement ascendant de la perception visuelle, la comparaison des deux conditions n'aurait pas du révéler d'activation au niveau des aires V1 et V2. Les auteurs suggèrent que ce résultat traduit l'influence descendante des neurones de MT sur les aires occipitales. Par extension il est possible de supposer que les aires motrices activées dans la situation biologiquement possible de Stevens et collaborateurs (1999), ont également une influence descendante.

4.3 Conclusion

L'étude de la perception du mouvement apparent indique que dans les cas où le stimulus représente le corps humain, la perception du chemin le plus court, traditionnellement observée, cède la place à la perception de trajectoires des membres compatibles avec les contraintes biomécaniques. Cette perception de mouvements biologiquement plausibles dépend fondamentalement de l'intervalle temporel séparant les présentations statiques des configurations corporelles. Lorsque ce délai est suffisamment important pour qu'un mouvement humain puisse avoir lieu, c'est ce mouvement qui est perçu le plus souvent. Lorsque le délai est trop court en revanche, les mouvements perçus obéissent au principe du plus court chemin. Si l'intervalle inter-stimulus est compatible avec la réalisation d'un mouvement biologiquement plausible, une activité d'aires pariétales, pré frontales temporales et sous-corticales, accompagne la perception du mouvement apparent. Il est supposé que cette activation contribue, d'une façon qui reste à déterminer, à la formation d'un percept biologiquement possible. Les résultats de Seghier et collaborateurs (2000) indiquent que cette contribution pourrait se faire de manière descendante.

5. RESUME

Dans ce chapitre, nous avons présenté de nombreux travaux concernant les caractéristiques cinématiques des mouvements biologiques ainsi que la perception visuelle de ce type de mouvement. Nous avons vu que le mouvement était un élément fondamental pour la reconnaissance des actions. Cette capacité de reconnaissance est relativement générale, rapide, précoce et elle subsiste lorsque de nombreux distracteurs masquent le signal biologique. En revanche cette capacité est perturbée lorsque le mouvement relatif des points est manipulé. Le fait que la reconnaissance de soi soit meilleure que la reconnaissance d'autrui suggère que l'expérience kinesthésique joue un rôle fondamental pour la perception des actions. Cette conclusion s'impose au vu des travaux concernant la loi de puissance $2/3$, l'anticipation perceptive et le mouvement apparent. La perception d'une vitesse uniforme, c'est-à-dire l'expérience subjective de l'uniformité, est fondée sur une préférence perceptive pour les mouvements biologiques. Les sujets sont, par ailleurs, capables d'utiliser des indices cinématiques très spécifiques pour prédire l'identité de l'unité d'action à venir de différents types de mouvements séquentiels (parole, écriture, saisie, pointage). Finalement, lorsque deux positions corporelles différentes sont successivement présentées, la perception d'un mouvement apparent biologiquement plausible prime sur la perception classique du plus court chemin dès que l'IIS correspond à des temps de mouvements possibles. La reconnaissance des actions pourrait être expliquée en partie par l'activation de populations de neurones sensibles aux configurations présentant ces caractéristiques. Ces populations de neurones pourraient bien être les mêmes que celles qui participent à l'exécution des actions. Nous reviendrons sur ce point dans le quatrième chapitre. Pour l'instant, nous allons aborder la question de la production et de la perception des séquences rythmiques.

III. TEMPO MOTEUR SPONTANE ET TEMPO PREFERE

Le terme tempo désigne, classiquement, la vitesse moyenne avec laquelle doit être exécuté un morceau de musique (moderato, allegretto, andante). Il est donné, en nombre de noires par minute, par le métronome de Maelzel, bien connu des musiciens. Sur cet appareil, les vitesses extrêmes vont de 40 à 208 noires par minute (de 1,5 s à 0.28 s entre deux frappes). Les valeurs médianes se situent entre 80 et 120 noires par minute.

La plupart des travaux présentés dans le chapitre précédent font référence aux mouvements humains d'un point de vue cinématique et dynamique. Nous avons insisté, sur le rôle du mouvement relatif des points pour la reconnaissance des actions, sur celui de la covariation vitesse/courbure pour l'impression d'uniformité, ou encore, sur celui des profils de vitesse pour l'anticipation perceptive. Les régularités cinématiques décrites dans ces expériences sont, en fait, relativement indépendantes de la durée absolue du mouvement. La loi de puissance $2/3$ est observée alors que la période moyenne des ellipses varie, de même que les phénomènes d'anticipation motrice sont valables pour des écritures plus ou moins rapides. Bien sûr, il existe des limites au-delà desquelles le mouvement se réorganise (recopier soigneusement l'ellipse, écrire très rapidement). Entre ces extrêmes cependant, il existe un ensemble de durées pour lesquelles les mouvements présentent les régularités que nous avons décrites.

Avec l'étude du mouvement apparent, le rôle du temps a été plus directement abordé. Il y a des durées minimales pour lesquelles le mouvement est possible, dans le sens où ces durées rendent la perception de ce mouvement possible. Lorsque les délais entre les photographies sont proches des durées réelles d'exécution des mouvements suggérés, la perception du chemin le plus long s'impose à la conscience du sujet. Pour les faibles durées, le plus court chemin est perçu et, lorsque ces durées sont trop longues, il n'y a pas de mouvement apparent. Il existe également des durées minimales pour lesquelles le mouvement est possible, dans le sens où ces durées sont des durées minimales d'exécution. En fait, pour la production comme pour la perception des actions il existe des limites temporelles.

Nous allons voir maintenant que, dans ces limites, les observations comportementales ne se distribuent pas aléatoirement. L'étude de la production et de la perception des séquences rythmiques permet, en effet, de dégager des sous ensembles de durées « spontanées » et « préférées ». Les deux parties qui vont suivre développent respectivement les notions de tempo moteur spontané et de tempo préféré. Nous allons voir que chaque être humain serait supposé posséder un tempo interne, une cadence naturelle, une vitesse à laquelle il opère ou fonctionne. Ce tempo interne réglerait nos activités quotidiennes, nos actions et nos perceptions.

1. LE TEMPO MOTEUR SPONTANÉ

De nombreuses actions impliquent la production de mouvements cycliques (marcher, sauter, taper du pied, applaudir). Ces activités cycliques sont caractérisées, comme tout les cycles, par une période. Cette période peut être fixée extrinsèquement. Il peut s'agir, par exemple, de suivre un rythme imposé par un métronome ou toute autre forme de cadence imposée de l'extérieur. La période peut, également, être déterminée intrinsèquement. C'est ce second aspect qui nous intéresse plus particulièrement. Lorsqu'il est demandé à des sujets de produire un mouvement cyclique à un tempo « spontané », ces derniers oscillent relativement faiblement autour d'une période de référence. Fraisse (1974) fut parmi les premiers auteurs à utiliser ce terme de tempo moteur spontané pour qualifier la période moyenne mesurée dans une tâche « d'applaudissement ». Dans cette étude la majorité des tempos adoptés étaient compris entre une et trois frappes par seconde, la période moyenne étant estimée par l'auteur à 0,6 s.

1.1 Mesure du tempo moteur spontané

La mesure du tempo moteur spontané se heurte à une difficulté méthodologique. Il s'agit de mesurer un temps, idéalement, débarrassé du mouvement. Les activités précitées impliquent de nombreuses articulations mobilisées au travers de coopérations musculaires différentes. Les forces en action (puissance du sujet, gravité et forces d'inertie par exemple) sont autant de facteurs pouvant déterminer la durée mesurée. Pour restreindre l'influence de ces facteurs, Kirby, Carr et MacLeod, (1990) demandent aux sujets de leurs expériences d'exécuter des frappes répétées et régulières avec un doigt (index) ou le pied à la cadence qui leur semble la plus confortable et la plus spontanée¹⁵. Ce type de tâche (tapping) ne sollicite que peu de masse musculaire et à un moindre coût énergétique. La réponse moyenne individuelle obtenue dans ces expériences est communément nommée tempo moteur spontané (TMS).

¹⁵ Les auteurs ajoutent parfois : ni trop rapide ni trop lent. Dans les consignes données au sujet, les termes, cadence, vitesse, tempo, ou fréquence sont indifféremment utilisés.

Le tempo moteur spontané peut être représenté par le nombre de battements par minute (*bpm*) ou par des intervalles inter-tapes (IIT) exprimés en *ms*. Habituellement, les IIT sont obtenus en calculant la durée entre le début de deux tapes successives. Si Fraisse (1974, 1982) avance la valeur de 0.6 s (100 *bpm*) comme étant la plus représentative du TMS, il est généralement admis que le tempo moteur spontané moyen se situe entre 70 et 130 *bpm* (IIT de 0.86 s à 0.46 s). C'est dans cette zone de valeurs que la plupart des auteurs ont obtenu leurs résultats. Les limites inférieure et supérieure de la distribution des TMS peuvent être estimées respectivement à 35 et 220 *bpm* (1.7 s et 0.27 s). Cette difficulté à fixer une valeur stricte pour la période moyenne est due, en partie, à l'importante variabilité inter-individuelle observée dans la plupart des études. Nous allons y revenir. Pour l'instant nous voulons préciser que le tempo individuel semble se moduler avec l'âge. La valeur moyenne de l'intervalle inter-tapes est estimée à 0.4 s pour les enfants de 4 ans, 0,5 s pour les enfants de 8 ans et 0,6 s pour les enfants de 10 ans. Après une période de relative stabilité à l'âge adulte où d'après Perilli (1995), le tempo obtenu est propre à chaque individu, le tempo spontané semble ralentir par la suite. Vanneste, Pouthas et Wearden, (2001) ont comparé les valeurs de TMS de jeunes adultes âgés de 24 à 29 ans à celles d'adultes plus âgés entre 60 et 76 ans. Les sujets les plus âgés ont un TMS moins élevé.

L'entraînement musical semble lui aussi jouer un rôle dans la vitesse et la variabilité du TMS. Les musiciens tendent à taper moins vite que les non-musiciens (Lapidaki & Webster, 1991; Drake, Jones & Baruch, 2000). Il convient de noter que Drake et collaborateurs (2000) n'observent ce résultat que chez les enfants âgés de 4 à 10 ans.

1.2 La variabilité inter-individuelle des tempos moteurs spontanés

Les résultats que nous venons de citer montrent déjà l'existence d'une variabilité interindividuelle. Toutefois, cette dernière pouvant être attribuée à un facteur identifiable, l'âge ou la pratique musicale, elle ne constitue pas à proprement parler la variabilité inter-individuelle, c'est-à-dire, la dispersion des TMS de sujets d'un même groupe. Cette dispersion peut être importante. Les valeurs extrêmes observées sont de 35 et 220 *bpm* (écart type = 40 – 50 *bpm*) dans des tâches de tapping (Gérard & Rosenfeld, 1995; Vanneste et al, 2001). Cette variabilité est réduite durant l'enfance. A

l'âge de 4 ans l'IIT oscille entre 0.35 s et 0.45 s et chez des enfants de 10 ans des valeurs de 0.3 s à 1 s sont observées (Drake et al, 2000). La variabilité inter-individuelle se manifeste encore plus nettement à l'adolescence et à l'âge adulte (Fraisse, 1974 ; Drake et al, 2000). Au fur et à mesure du développement de l'enfant une référence plus personnelle se construit : les individus se singularisent. Pour finir sur la question de la variabilité inter-individuelle, Fraisse (1974) rapporte les résultats d'une étude portant sur des jumeaux. Les différences de TMS entre des jumeaux monozygotes n'étaient pas plus grandes qu'entre deux exécutions du TMS par un même sujet. En revanche, les différences étaient aussi grandes entre jumeaux hétérozygotes qu'entre deux sujets pris au hasard. Ce résultat pourrait être attribué à une détermination génétique de la période de référence.

1.3 La variabilité intra-individuelle des tempos moteurs spontanés

Si la variabilité inter-individuelle est importante, la variabilité intra-individuelle est relativement faible à l'âge adulte (Fraisse, 1974). Cette variabilité dépend en partie d'un facteur « session ». En effet, le TMS d'un même sujet varie généralement d'une session sur l'autre. Pour obtenir un TMS stable d'une séance à une autre, les sujets doivent s'adapter à la tâche et à la situation. Ainsi, quelques séances préalables avant les expérimentations permettent de mesurer un TMS plus stable entre les sessions. En fait, avec la répétition des sessions, les sujets évoluent rapidement vers une valeur personnelle qui ne varie par la suite que très faiblement. Le TMS mesuré lors de la première session est généralement plus lent que celui mesuré lors de sessions suivantes et il est également observé que la fréquence du TMS augmente légèrement au cours des premières sessions de test (Fraisse, 1974 ; Drake et al, 2000).

A l'intérieur d'une même session, les sujets restent très réguliers, la variabilité entre les intervalles successifs étant en moyenne de 4 à 6 % de l'IIT moyen (Fraisse, 1974 ; Collyer, Broadbent & Church, 1994). C'est à l'âge de 14 ou 15 ans, que la variabilité intra-individuelle se stabilise autour des 5 % (Mishima, 1965). C'est également à cette âge que les différences interindividuelles de tempos s'affirment. Il est notable que le TMS des musiciens est moins variable que celui des non-musiciens (Lapidaki et Webster, 1991). Ce dernier point renforce l'idée que le tempo n'est pas indépendant de l'exercice de cette capacité à produire des séquences rythmiques.

1.4 Origine du tempo moteur spontané

La diversité des appellations reflète bien les divergences des points de vue concernant l'origine de ces périodes de références. Les expressions, tempo spontané moteur (Fraisse, 1974), subjectif (Perilli, 1995), naturel (Temperley, 1963), personnel (Kumai et Sugai, 1997), psychomoteur (Roth, Wünderlich & Pögel, 1985), interne (Kir-Stimon, 1977) sont utilisées. Les termes : préféré, cognitif, individuel, psychique ou congénital apparaissent également dans la littérature. Nous réserverons le terme de tempo préféré pour les travaux concernant la perception des séquences rythmiques (le terme de tempo perceptif spontané pourrait également convenir).

Fraisse (1974) définissait le TMS comme une activité motrice commandée par un programme temporel propre à chaque individu et qui dépendrait peu des conditions de l'action. L'auteur note, à propos du tempo spontané que son « déterminisme héréditaire le rapproche d'une part des rythmes biologiques comme ceux du cœur et d'autre part des manifestations rythmiques comme celles du balancement spontané » (Fraisse, 1974, p.43). D'autres auteurs ont également suggéré que le tempo moteur spontané pouvait être déterminé par des facteurs environnementaux et biologiques (Kir-Stimon, 1977 ; Boltz, 1994), tout en étant non spécifique d'un processus physiologique donné ou d'un processus central. Par exemple, Boltz (1994) suggère que le tempo moteur spontané est caractéristique du système neurologique dans son ensemble. Pour Perilli (1995), le tempo subjectif serait une construction personnelle, paramétrée sur des bases neurophysiologiques, pour organiser les processus cognitifs internes et émotionnels. Finalement, Vanneste et al. (2001) proposent que le TMS puisse être le reflet du tempo interne d'un individu, renvoyant ainsi à la période d'un mécanisme interne ou d'une horloge interne. Drake et al. (2000) nomment cette période, la période de référence. Lorsque qu'un individu tape du doigt régulièrement sans référence temporelle externe, le TMS adopté reflèterait probablement sa période de référence naturelle ou son tempo interne.

1.5 Tempo et états physiologiques

Le terme d'activation renvoie, ici, à toute une variété d'états physiologiques et comportementaux caractérisés par un niveau d'excitation ou de mobilisation énergétique particulier (Duffy, 1972). Les mesures de l'activité du système végétatif, les électroencéphalogrammes et l'analyse comportementale des états de veille et de sommeil, témoignent de ces variations. Au cours des 24 heures d'une journée, notre niveau de vigilance (mesuré par des indices physiologiques précités) suit une courbe sinusoïdale. Schématiquement, les pics d'activité sont situés entre 5 et 8 h et entre 17 et 20 h. Entre 11 et 14 h et entre 23 h et 5 h l'activité est plus faible (Reilly, Atkinson & Waterhouse, 1997). Les fluctuations du niveau de vigilance sont précédées par une fluctuation de notre température corporelle. Lorsque la température s'élève, notre organisme se prépare à une phase active, il est éveillé. Lorsque la température baisse, la vigilance diminue. La mesure répétée du tempo moteur spontané au cours de la journée permet d'observer une corrélation négative entre TMS et température interne. Kikkawa (1978) mesure le TMS à 5 horaires successifs espacés de 3 heures sur 3 jours : 7 h, 10 h, 13 h, 16 h, 19 h, et 22 h (sur 10 sujets, pendant 10 secondes et pendant 3 jours). Le TMS augmentait entre 7 h et 13 h, puis ralentissait de manière continue de 13 h à 22 h. Dans une autre étude, Oléron, Fraisse, Siffre & Zuili, (1970) ont analysé des variations du TMS, chez un sujet unique demeuré 174 jours dans une grotte sans repère temporel. Le TMS était évalué sur des intervalles de 10 s chaque fois qu'il se livrait à une activité dite repérable (réveil, coucher, repas, mictions). Les résultats montrent que le TMS augmente faiblement mais continuellement tout au long de la durée du séjour. Une variation attribuable au cycle veille/sommeil est également observée. Enfin, et sur un registre plus psychologique, Perilli (1995) a étudié les variations du TMS lorsque l'on demandait aux sujets de se mettre dans un état d'esprit ou une humeur, soit colérique, triste ou joyeux, sans toutefois contrôler ces états avec des indices physiologiques. Les résultats ont montré que la fréquence des tapes diminuait lorsque le sujet se mettait en condition de tristesse, alors qu'elle augmentait en situation de joie, suggérant un lien entre l'état émotionnel du sujet et son tempo moteur spontané.

De nombreuses recherches ont tenté de mettre en relation le TMS et la fréquence du cycle locomoteur ou cardiaque (Kirby, Carr & MacLeod, 1990 ; Iwanaga, 1995a ;

1995b). Les résultats de ces recherches, bien que montrant l'existence de relations entre ces différentes variables, ne concluent pas que le TMS puisse être assimilé au cycle locomoteur ou cardiaque. Il semble, comme le proposait déjà Fraisse (1982), que le tempo fait référence à une réalité complexe dans laquelle de nombreuses variables sont confondues.

1.6 Conclusion

Les activités motrices cycliques sont caractérisées, comme tous les cycles, par une période. Cette période peut être estimée dans des tâches de tapping qui minimisent l'influence des facteurs biomécaniques. Il paraît raisonnable de fixer une zone de valeurs centrales (de 70 à 130 *bpm* ; IIT de 0.46 *s* à 0.85 *s*) dans laquelle la plupart des auteurs ont obtenu leurs résultats. Le tempo moteur spontané dépend de l'âge et semble propre à chaque individu. Les valeurs extrêmes vont de 35 à 220 *bpm* (1,7 *s* à 0.27 *ms*) dans les tâches de tapping. La variabilité inter-individuelle du TMS est réduite durant l'enfance et augmente jusqu'à l'âge adulte. La variabilité intra-individuelle en revanche diminue de l'enfance à l'adolescence où elle se stabilise autour de 5 %. Avec la pratique, les sujets convergent rapidement vers leur tempo de référence qui reste alors relativement stable entre les sessions. Les fluctuations du TMS entre les sessions sont corrélées avec le cycle de vigilance et l'état émotionnel du sujet. Le TMS pourrait être le reflet d'un tempo interne individuel. La période de référence adoptée serait déterminée par une horloge interne.

2. LE TEMPO PREFERE

Nous avons pris le parti de distinguer le tempo moteur spontané, abordé dans la partie précédente, du tempo préféré. Cette distinction repose essentiellement sur le fait que le premier est produit alors que le second est perçu. Le TMS est généralement obtenu par la production de tapes digitales à une cadence qui semble au sujet la plus confortable, naturelle et spontanée. Le tempo préféré (ou favori) correspond, quant à lui, à la sélection d'une vitesse de succession d'intervalles de sons ou de lumières. Le sujet n'effectue aucune tâche motrice mais choisit parmi différents rythmes, celui qui lui paraît le plus naturel ou agréable. Ces deux tempos partagent toutefois la même perspective : chaque être humain serait supposé posséder un tempo interne, une cadence naturelle qui réglerait nos activités quotidiennes, nos actions et nos perceptions. L'estimation de cette période de référence par la mesure du TMS s'est particulièrement développée en Psychologie. La mesure du tempo préféré est plus largement utilisée dans les études de musicologie. Compte tenu des similarités entre les deux concepts, nous développerons dans cette partie quelques points qui concernent aussi la précédente. Après une rapide présentation de quelques résultats classiques nous résumerons les structures nerveuses engagées dans la production et la perception des séquences rythmiques.

2.1 Valeurs du tempo préféré

La notion de tempo se réfère à la terminologie italienne utilisée par les compositeurs d'œuvres musicales (*adagio* ou *andante*, par exemple). Comme l'indiquent les termes utilisés, ces tempos étaient basés sur la motricité et l'affectivité, et décrivaient plus un mouvement général qu'une cadence précise. Pour l'estimation du tempo préféré les sujets doivent choisir parmi un échantillon, ou ajuster directement, la cadence d'une séquence régulière de sons ou de lumières. La plus naturelle, la plus confortable ou agréable doit être choisie. Cette suite régulière de stimuli visuels ou sonores doit donc être estimée par le sujet comme étant ni trop lente ni trop rapide. Ces tempos préférés correspondent souvent aux valeurs du TMS avec des intervalles préférentiels variant de 0.5 s à 0.75 s (120 – 86 bpm). Ces valeurs sont obtenues lorsque l'on demande aux sujets de rechercher leur tempo préféré en ajustant la vitesse de succession de bips (Iwanaga, 1995a ; 1995b). Des résultats similaires sont obtenus en utilisant des pièces musicales (Iwanaga et Tsukamoto, 1998). Dans ces expériences, la procédure implique également que le sujet choisisse le tempo qu'il préfère en faisant varier la vitesse de la musique. En revanche, dans une étude originale, Moelants (2002) observe la distribution des tempos de 74042 pièces musicales (listes bpm). Le tempo

minimum observé est de 32 *bpm*, le maximum est aux alentours des 300 *bpm*. Très peu de tempos se trouvent près de ces limites. En fait, près de 80 % des observations sont situées entre 81 *bpm* et 160 *bpm* (0.37 – 0.74 *s*) et un pic très net apparaît entre 120 *bpm* et 130 *bpm* (0.46 – 0.5 *s*).

Indépendamment du protocole utilisé, la valeur du tempo préféré semble rester dans une gamme de fréquence relativement stable, entre 80 *bpm* et 130 *bpm* (0.75 – 0.46 *s*). Ces valeurs sont très proche des valeurs obtenues pour le TMS (IIT de 0.86 *s* à 0.46 *s*). La variabilité intra-individuelle du tempo préféré semble aussi minime que celle du TMS (5 %). Finalement, et en rapport avec l'effet du niveau d'activation développé dans la partie précédente, Brown (1981) observe que le tempo préféré d'un musicien sur un même morceau musical varie selon l'horaire de la journée. Enfin, il faut signaler que Mishima (1956) observe une corrélation entre le tempo moteur spontané et le tempo préféré (auditif et visuel). Pour une même sujet les corrélations entre tempo spontané et préféré sont de l'ordre de 0.70.

2.2 Structures nerveuses impliquées dans la production et la perception des tempos

Il est possible d'identifier trois zones particulièrement importantes pour la production et la perception des séquences rythmiques. La première est le système nigro-striatal (de la substance noire au corps strié). En effet, ce système qui est dopaminergique, semble participer à l'estimation des intervalles temporels. Des études de pharmacologie montrent, sur le rat, que l'administration de méthamphétamines entraîne une sous-estimation de l'intervalle de temps entre deux frappes successives sur un dispositif permettant d'accéder à de la nourriture. En revanche, l'administration d'halopéridol, entraîne une surestimation de ce même intervalle de temps. Ces deux substances ont des propriétés opposées. La première augmente la production de dopamine dans les systèmes dopaminergiques et la seconde est au contraire un inhibiteur de la production de ce neurotransmetteur (Meck, 1996). Ces résultats sont confirmés chez l'homme grâce à l'étude des performances des patients atteints de pathologie des ganglions de la base¹⁶ (Gibbon, Malapani, Dale & Gallistel, 1997). Dans l'ensemble l'activité du système nigro-striatal, lui aussi dopaminergique, est perturbée chez ces patients. Les résultats montrent que ces derniers sous-estiment les durées courtes et surestiment les durées longues. Ce système pourrait constituer la base du

¹⁶ Chorée, Balisme, Chorée de Huntington, Tremblement, Myotonie, Tics, Maladie de Parkinson (idiopathique et atypique), toutes ces pathologies résultent, plus ou moins directement, d'une atteinte basale.

mécanisme d'horloge interne suggéré par les travaux précédents. Les impulsions régulièrement émises par la substance noire seraient accumulées dans la partie dorsale du striatum. Chez l'animal, le cervelet semble également participer au codage temporel. Les patients présentant des lésions de cette région frappent de manière irrégulière et ont également plus de difficultés que des sujets contrôles à discriminer les intervalles brefs entre deux sons. Les mouvements de ces patients sont caractérisés par un manque de fluidité, ils sont marqués par des à-coups. Les patients peuvent présenter des troubles de la locomotion. L'étude de l'activité métabolique au niveau de cette structure lors de tâche de discrimination et de synchronisation sur des durées brèves (audition et vision) indique une augmentation du débit sanguin cérébral au niveau des hémisphères cérébelleux et du vermis¹⁷ (Jueptner, Rijntjes, Weiller, Faiss, Timmann, Mueller & Diener, 1995). Cette étude utilisant la technique du PET scan indique par ailleurs que l'activité augmente significativement au niveau des cortex temporal, pré-frontal et cingulaire, ainsi qu'au niveau des ganglions de la base. Enfin, le lobe frontal pourrait être la troisième zone impliquée dans le codage de la durée des événements (Meck, 1996). Les effets de l'atropine et de la physostigmine, substances qui diminuent et augmentent respectivement la production de choline des neurones de cette région suggère qu'une mémoire des intervalles temporels pourrait exister dans cette région. Enfin, les patients porteurs de lésions du cortex préfrontal et de l'aire motrice supplémentaire ont des performances moins bonnes que celles de sujets contrôles dans des tâches de discrimination de durées brèves (Lejeune & Macar, 1994).

2.3 Conclusion

Le tempo préféré est estimé dans des tâches de perception. Le sujet doit généralement indiquer la cadence de succession de bips ou de flash lumineux qui lui paraît la plus agréable, confortable ou naturelle. Les résultats obtenus sont comparables à ceux des tâches de tapping. La distribution des tempos en musique reflète cette préférence naturelle des systèmes perceptifs pour certaines cadences. L'horloge interne supposée être à l'origine des tempos préférés impliquerait principalement 3 zones : le système nigro-striatal, le cervelet et le cortex frontal (en particulier SMA et le cortex pré moteur).

¹⁷ Le vermis est la partie médiane du cervelet, aussi appelé spino-cervelet lorsqu'il est associé à une zone intermédiaire dont les limites sont encore mal définies. Cette partie du cervelet est considérée comme une zone importante d'intégration des informations sensorielle en provenance de la périphérie.

3. RESUME

Un grand nombre d'actions impliquent la production de mouvements cycliques. La périodicité de ces mouvements peut être fixée intrinsèquement. Dans des tâches de tapping, où le sujet frappe à l'aide du doigt ou du pied à la cadence qui lui semble la plus confortable et la plus spontanée la réponse obtenue est nommée « tempo moteur spontané » (TMS). La valeur moyenne du TMS peut être estimée à 0.6 s. Toutefois, il paraît plus raisonnable de fixer une large zone de valeurs (de 70 à 130 *bpm* ; IIT = 0.46 – 0.86 s) dans laquelle la plupart des auteurs ont obtenu leurs résultats. Les limites inférieures et supérieures de la distribution des tempos sont respectivement, et approximativement, estimées à 35 et 220 *bpm* (1.7 – 0.27 s). Cette difficulté à fixer une valeur stricte provient des variations inter-individuelles importantes observées dans la plupart des études. Ces tempos seraient propres à chaque individu et ralentissent avec l'âge. La variabilité intra-individuelle diminue de l'enfance à l'adolescence où elle se stabilise autour de 5 %. La pratique permet aux sujets de se fixer autour d'une valeur de référence qu'ils conservent par la suite. Il existe un lien entre le niveau d'activité physiologique ou l'état émotionnel du sujet et son tempo moteur spontané.

Le tempo préféré, ou favori, correspond à la sélection d'une vitesse de succession d'intervalles de sons ou de lumières. Le sujet n'effectue aucune tâche motrice mais choisit parmi différents rythmes, celui qui lui paraît le plus naturel ou agréable. Les résultats obtenus sont comparables à ceux mesurés lors de la production. Ces deux tempos partagent la même perspective : chaque être humain serait supposé posséder un tempo interne, une cadence naturelle qui conviendrait pour l'action et la perception. L'horloge interne, supposée être à l'origine des tempos, impliquerait principalement trois zones : le système nigro-striatal, le cervelet et le cortex frontal (en particulier SMA et le cortex pré moteur).

Enfin, il faut souligner que nous avons laissé de côté de nombreux travaux concernant la production et la perception des séquences rythmiques. Nous avons délaissé (sauf pour aborder la question des structures nerveuses) les études dans lesquelles un tempo externe est imposé aux sujets. Dans ce domaine, les travaux de Wing et Kristoffersen, (1973a, 1973b), concernant la variabilité de l'horloge interne, et de Hazeltine, Helmuth et Ivry, (1997), concernant le rôle du cervelet, méritaient d'être cités.

IV. LE MOUVEMENT IMAGINE

Jusqu'à présent nous avons abordé la neurophysiologie du système visuel, la perception des mouvements biologiques et la production/perception des séquences rythmiques. Nous avons vu que la perception et la production des actions impliquaient de nombreuses structures corticales et sous-corticales dont l'activité pouvait, plus ou moins directement, être associée aux réponses comportementales mesurées. Ces réponses consistent soit en une reconnaissance, une discrimination, ou un jugement de la part du sujet, soit en une mesure du comportement du système visuel face à des stimuli dont les caractéristiques temporelles ou cinématiques ont été manipulées. Les analyses mettent en évidence des liens entre la perception et la motricité. Pour résumer, les mouvements que nous produisons sont ceux qui nous conviennent le mieux sur un plan perceptif. Ils sont rapidement détectés, ils guident plus efficacement l'action, et nous les préférons. En résumé, le système perceptif et le système moteur sont accordés.

Nous allons, maintenant, traiter plus particulièrement de la question du rapport de la motricité aux représentations motrices. Jusqu'à présent le terme « représentation » a été utilisé dans un sens très général. En parlant des modèles internes nous avons utilisé ce terme mais sans jamais avoir abordé la question du format de ces représentations. La raison en est simple : ce format nous est inconnu. Même les algorithmes utilisés pour simuler ces modèles représentant l'environnement (ou le système sensori-moteur) échappent rapidement au déterminisme des équations dont ils dépendent¹⁸. Nous allons nous intéresser aux situations de mouvement imaginé. Il est en effet possible de demander aux sujets d'une expérience de produire des images mentales des mouvements humains, d'imaginer le mouvement. Nous allons voir que ces images, qui traduisent une exécution interne de l'action, partagent de nombreuses similarités avec l'action elle-même.

¹⁸ Voir *chaotique*

1. MOUVEMENTS IMAGINES : LES REPRESENTATIONS MENTALES MOTRICES

Les mouvements sont sans doute plus difficiles à décrire verbalement que les objets. En fait, l'image du mouvement semble être le mouvement lui-même et sa description ne passe pas par les mots mais par le corps. Le terme image prend ici un sens non-figuratif, l'image c'est le mouvement. Bien sûr, il est toujours possible d'imaginer des mouvements du point de vue d'une tierce personne (imaginer que quelqu'un marche plutôt que de s'imaginer en train de marcher) mais dans ces situations également, l'image conserve un statut dynamique. Ces images mentales motrices ou représentations mentales motrices (Jeannerod et Decety, 1995) n'en sont pas moins accessibles par des mesures appropriées et, en particulier, la chronométrie mentale. Les mesures de l'activité physiologique (musculaire, cardiaque, respiratoire) et la neuroimagerie sont également des outils appropriés pour saisir la nature des représentations motrices qui sous-tendraient la capacité humaine à produire ces images motrices.

1.1 La mesure de la durée des mouvements imaginés

La chronométrie mentale consiste à mesurer le temps mis par un sujet pour effectuer mentalement une action donnée. Il s'agit donc de mesurer un temps de mouvement imaginé. Dans ces situations, le sujet tient un chronomètre dans sa main, chronomètre qu'il déclenche au début et arrête à la fin du mouvement imaginé. Dans un autre cas de figure, le sujet presse un bouton pendant toute la durée du mouvement imaginé et le relâche à la fin. Ces deux techniques, permettent de mesurer la durée des mouvements imaginés. Nous verrons qu'il est également possible d'utiliser un métronome pour mesurer la fréquence des mouvements imaginés rythmiques. Le sujet exécute mentalement le mouvement en suivant un rythme imposé par le métronome. Le métronome est alors progressivement accéléré et le sujet dit « stop » lorsqu'il ne parvient plus à suivre le tempo. Cette méthode est particulièrement utilisée dans des situations où une relation entre vitesse et précision est testée.

1.2 Mouvements imaginés et rotations mentales

Georgeopoulos et Massey (1987) demandent à des sujets de déplacer une manette dans une direction, décalée de plusieurs degrés (5° , 10° , 15° , 35° , 70° , 105° , 140°) dans un sens horaire et/ou anti-horaire, par rapport à une direction de référence variable d'un essai sur l'autre. Les auteurs mesurent le temps de réaction (TR) des sujets. Les résultats indiquent que le TR est positivement corrélé avec la distance angulaire qui sépare la direction donnée de la direction souhaitée. Les auteurs concluent que la tâche (initialement cognitive) implique une rotation mentale (un déplacement imaginé) de la direction de référence d'un nombre de degrés correspondant aux instructions. Les sujets simuleraient un déplacement de la direction de référence du nombre de degrés requis, et cette simulation aurait fondamentalement les caractéristiques temporelles de l'exécution réelle d'une rotation. Le temps de réaction de base (l'ordonnée à l'origine indique un TR de base de 80 *ms*) augmente proportionnellement avec l'amplitude de l'écart en degré. La pente de régression (2.28 en $^\circ/s$) indique que la vitesse de rotation mentale est de près de $420^\circ/s$. Ces résultats sont à mettre en rapport avec les travaux de Georgeopoulos, (1991), sur le codage de la direction des mouvements du bras (Georgeopoulos & Pellizzer, 1995)

1.3 Activité physiologique et réseaux neuronaux associés aux mouvements imaginés

Un certain nombre d'observations suggèrent que le mouvement imaginé fait appel aux mêmes structures nerveuses que celles impliquées par la préparation et la planification des actions. Par exemple, les mouvements imaginés peuvent parfois s'accompagner d'un accroissement sub-liminaire de l'activité musculaire mesurée par l'électromyogramme (Wehner, Vogt & Stadler, 1984). Cependant, cette activité n'est pas systématiquement détectée. En revanche, une augmentation de l'activité cardiaque et respiratoire est toujours mesurée dans les tâches de mouvement imaginé impliquant un effort important (mouvements de pédalage avec lest), signalant l'activation par le mouvement imaginé du système nerveux autonome (Decety, Jeannerod, Germain, Pastene, 1991 ; Decety, Jeannerod, Durozard, Baverel, 1993). Ce fait n'est pas trivial.

Déjà, ces résultats suggèrent que les représentations motrices intègrent les contraintes d'une préparation physiologique au mouvement. Ensuite, ils montrent, que les images mentales motrices ont, fondamentalement, les mêmes propriétés que l'intention d'agir. Elles s'accompagnent d'une véritable exécution interne de l'action (simulation). Il est d'ailleurs admis que le mouvement imaginé participe directement à l'apprentissage de séquences motrices et à une forme mentale d'entraînement sportif.

Les corrélats de cette exécution interne de l'action sont facilement mis en évidence par des études utilisant la technique de l'IRMf ou de la TEP. Pour résumer les principales observations : la plupart des aires impliquées dans le contrôle de la motricité sont activées par les situations de mouvement imaginé. Dans la plupart des études, le sujet est allongé dans l'appareil d'imagerie et observe un écran où lui sont présentés les instructions et les stimuli. Le sujet doit généralement imaginer différentes actions (saisir un objet, déplacer une manette, marcher). L'activité cérébrale est mesurée dans une condition de base (sans activité), une condition de contrôle (reprenant les caractéristiques pratiques de la tâche), et des conditions d'intérêts (qui isolent un aspect particulier du phénomène étudié). Une revue exhaustive des différents travaux d'imagerie fonctionnelle est proposée par Grèzes & Decety, (2001). La revue est une méta-analyse qui couvre, non seulement, le domaine de la simulation mentale des mouvements mais aussi l'exécution, l'observation et la verbalisation des actions. Ce sont les résultats concernant le mouvement imaginé qui nous intéressent plus particulièrement. Ces résultats, une synthèse de 6 études, indiquent que la partie dorsolatérale du cortex pré-frontal, le gyrus pré-central (l'aire motrice primaire, 30 % du niveau observé lors de l'exécution), l'aire motrice supplémentaire, le gyrus cingulaire, la partie inférieure du lobe pariétal, le cervelet et un certain nombre de noyaux sous corticaux sont activés dans les situations de mouvements imaginés. Des activations au niveau du lobe temporal (le gyrus temporal moyen, temporal inférieur et l'aire MT) sont observées dans les situations d'observation et/ou de verbalisation. Les situations de simple observation d'actions, particulièrement pertinentes pour notre sujet, activent un grand nombre des aires précitées (le gyrus frontal inférieur, le gyrus frontal moyen, le cortex pariétal à gauche et le gyrus temporal moyen). L'observation, dans le but

d'imiter l'action, active, plus particulièrement l'aire SMA, le gyrus cingulaire, et le gyrus frontal moyen.

1.4 Observations cliniques

Il est intéressant d'analyser les résultats des études de cas cliniques dans lesquelles sont comparées les capacités d'imagerie mentale de patients atteints, respectivement, de lésions frontales et pariétales (Sirigu & Duhamel, 2000). Dans cette étude, les patients effectuent mentalement et réellement plusieurs tâches répétitives (mouvements d'opposition doigts/pouce, flexion/extension de la main, du poignet, du coude). Les deux membres supérieurs sont testés, l'expérimentateur donne le top et les sujets indiquent la fin du mouvement. La première tâche est également effectuée, pour les deux mains, avec un tempo externe (métronome). Dans le cas de la patiente C.P. qui souffre d'une lésion de la région rolandique (région de l'aire motrice primaire) et qui présente des troubles du mouvement limités à l'extrémité distale du bras gauche, la comparaison des durées de mouvements imaginés et exécutés indique une parfaite correspondance. Le membre utilisé influence à la fois, et dans la même proportion, la durée des deux types de mouvements (imaginés, exécutés). Mieux, la différence liée au membre utilisé diminue de la même manière pour les deux types de mouvements au fur et à mesure que la tâche implique le contrôle d'articulation plus proximale. Indépendamment de la modalité, la différence entre membre gauche et membre droit est maximale pour la tâche de mouvement des doigts et minimale (non significative) pour la tâche de mouvement de l'épaule. Ce pattern de résultat indique qu'une atteinte frontale perturbant l'exécution du mouvement affecte également sa simulation mentale. Pour la seconde tâche (métronome), les mouvements imaginés sont exécutés avant la mesure des temps réels. Le sujet répète mentalement la tâche en accord avec le rythme du métronome et signale le moment où il ne parvient plus à suivre ce rythme. Les rythmes d'exécution mentale mesurés pour chaque main prédisent les durées réelles observées par la suite.

Dans le cas de la patiente L.L. atteinte de lésions bilatérales du cortex pariétal, les résultats sont sensiblement différents. Pour les mouvements des doigts — les auteurs

ajoutent certains mouvements comme « croiser le majeur et l'index » — les résultats montrent que les durées d'exécution sont supérieures au temps des mouvements imaginés. Ce résultat est indépendant de la main utilisée (atteinte bilatérale). Les auteurs précisent que dès lors que la tâche implique les doigts, l'imagerie se dissocie de l'exécution. Étrangement, la patiente L.L. indique qu'elle a des difficultés à imaginer les mouvements des doigts. Les temps de mouvements imaginés pour la main droite sont d'ailleurs plus importants pour la patiente L.L que pour la patiente C.P.

Pour résumer, les résultats indiquent, que le déficit moteur s'accompagne d'une représentation de ce déficit comme en témoigne la bonne corrélation des durées imaginées et réelles. La patiente C.P. est capable d'imaginer le mouvement perturbé de la partie distale de son membre supérieur gauche. En revanche l'atteinte pariétale entraîne une dissociation des durées imaginées et réelles. Cette dissociation ne peut être attribuée ni à une atteinte motrice, ni à une atteinte globale des capacités d'imagerie. Les auteurs suggèrent que le trouble de représentation associé aux lésions pariétales concerne de façon spécifique « la main en mouvement ».

1.5 Conclusion

Les images mentales motrices révèlent quelques-unes des caractéristiques des représentations motrices qui participeraient à l'exécution des actions. Le mouvement imaginé montre que ces représentations motrices peuvent être manipulées consciemment par un effort volontaire du sujet qui imagine l'action. Ces simulations internes s'accompagnent de modifications du niveau d'activité physiologique indiquant que les représentations motrices intègrent, et donc anticipent, les contraintes associées à la préparation de l'organisme pour l'action. Alors que les conceptions classiques du contrôle moteur supposent différentes étapes de la préparation des actions (intention, planification, programmation, exécution, évaluation, Paillard, 1994), ces résultats suggèrent que la programmation est déjà partie intégrante, sinon la base, de l'intention d'agir. En effet, compte tenu des structures motrices activées par le mouvement imaginé, il semble évident que la représentation de l'action s'accompagne, et certainement implique, une réelle programmation de l'action. Les études de cas cliniques indiquent cependant que les atteintes frontales n'entraînent pas de déficit de l'imagerie motrice contrairement aux atteintes des lobes pariétaux. Cette zone pourrait jouer un rôle clef dans la représentation des mouvements (en particulier de la main). Les résultats des études cliniques suggèrent dans le cas de C.P. une très bonne correspondance temporelle entre les mouvements imaginés et exécutés. Nous allons maintenant tester à quel point ces mouvements imaginés sont similaires aux mouvements réels chez le sujet normal. Reste-t-il des aspects de l'action qui ne font pas partie des représentations motrices, des caractéristiques qui dépendraient uniquement du système d'exécution ?

2. MOUVEMENTS IMAGINES ET PRINCIPES MOTEURS

Nous venons de voir que les images mentales motrices s'accompagnent d'une véritable exécution interne de l'action. Il devient alors intéressant de mesurer le degré de similitude entre actions imaginées et actions exécutées. Des différences observées entre ces deux situations renseigneraient sur les contenus des représentations motrices. Plusieurs études ont adopté cette approche en utilisant les méthodes chronométriques développées plus haut. Ici, nous allons nous intéresser plus particulièrement à deux phénomènes bien connus dans le domaine du contrôle moteur : le principe d'isochronie et la loi de Fitts.

Le principe d'isochronie a été brièvement abordé au second chapitre. Il peut être défini comme la propension du système moteur à augmenter le gain de vitesse des mouvements en fonction de leur amplitude (Viviani et Flash, 1995). La loi de Fitts, pour sa part, exprime une relation entre la vitesse et la précision des mouvements de pointages vers des cibles de tailles variables (Fitts, 1954). Le temps de mouvement est une fonction logarithmique de l'indice de difficulté (le rapport de la distance de pointage à la largeur de la cible). Si l'existence d'une composante centrale de l'isochronie ne semble faire aucun doute, la loi de Fitts pourrait en revanche être plus directement dépendante de l'exécution. En effet, des sous mouvements, traduisant un contrôle sensoriel de l'approche finale de la cible accompagnent l'augmentation du temps de mouvement (Meyer, Smith, Kornblum, Abrams, & Wright, 1990, Plamondon & Alimi, 1997).

2.1 Principe d'isochronie

Les mouvements imaginés obéissent-ils au principe d'isochronie ? Cette question a fait l'objet d'une étude (Decety et Michel, 1989). Dans cette expérience, les auteurs comparent les temps de mouvements imaginés et réels pour l'écriture d'une phrase ou le dessin d'un cube de Necker (12 traits). La main utilisée (droite et gauche) et la taille des lettres et du cube (grande et petite) font également partie des variables de l'expérience. Dans la condition de mouvement imaginé, les sujets ($n = 6$) étaient invités à se « sentir eux-mêmes réaliser le mouvement d'écriture ou de dessin avec la main appropriée et l'amplitude requise ». Ils pressaient un bouton au début de l'action mentale et le relâchaient à la fin de cette dernière. Avant le début de l'essai le sujet recevait, dans un ordre fixe (tâche, modalité, main, taille), les instructions verbales

concernant la tâche. Les résultats indiquent que les temps de mouvements réels et imaginés concordent. Il n'y a pas de différence significative entre les durées de mouvements imaginés et réels. Concernant la validité du principe d'isochronie, les auteurs précisent que l'amplitude n'affecte pas significativement les temps de mouvements (imaginés ou réels). En revanche, et conformément à ce qui est observé pour l'exécution des mouvements, un effet significatif de la main utilisée est observé. Les sujets (tous droitiers) mettent plus de temps avec la main gauche. Ce facteur n'interagit pas avec la modalité (imaginé/réel). Les auteurs concluent que « les mouvements réels et imaginés pourraient être gouvernés par les mêmes programmes moteurs, du moins pour ce qui concerne les contraintes d'amplitude et de temps », Decety et Michel, (1989). Alors que les sujets supposent, dans la plupart des cas, que les mouvements de plus grandes amplitudes prennent plus de temps, les durées mesurées pour les mouvements imaginés n'obéissent pas à cette heuristique (il faut plus de temps pour aller plus loin). Cette étude indique que le principe d'isochronie est valable pour les mouvements imaginés. Il faut cependant préciser que, lors de l'exécution des mouvements, le principe d'isochronie n'est pas absolu contrairement à ce que le terme laisse entendre. Dans les situations classiques, une augmentation de temps moins que proportionnelle à la longueur de la trajectoire est généralement observée. Nous reviendrons sur ce point dans la partie expérimentale. Nous allons nous intéresser maintenant à la fonction d'échange entre vitesse et précision décrite par Fitts, (1954).

2.2 Loi de Fitts

Lors de l'exécution mentale des actions, il est possible de supposer qu'un certain nombre de contraintes liées à l'exécution réelle de la tâche sont absentes. Par exemple, lorsqu'un sujet exécute réellement un mouvement de pointage vers une cible de petit diamètre, cette dernière impose un contrôle de l'approche finale qui implique l'extraction d'informations visuelles concernant le mouvement et la cible (un pointage de précision les yeux fermés est impossible). Lors de l'exécution de mouvements imaginés, la cible n'est pas présente physiquement. Cette absence de contraintes spatiales extérieures pourrait bien conférer un statut particulier aux relations vitesse/précision dans des situations de mouvements imaginés. Cette question a été principalement abordée dans trois études.

Les durées imaginées de mouvements de locomotion ont été mesurées à l'aide d'un système de réalité virtuelle par Decety et Jeannerod (1996). Dans cette expérience,

les sujets sont assis confortablement et équipés d'un casque de réalité virtuelle. L'environnement présenté comprend trois ponts virtuels, de largeurs différentes (45, 90 et 135 *cm*) et situés à des distances différentes (3, 6, 9 *m*). Après une phase de familiarisation, dans laquelle les sujets se déplacent virtuellement dans l'environnement utilisé selon un schéma programmé, un des 9 ponts possible est présenté. A chaque essai, les sujets doivent observer, puis marcher mentalement vers le pont présenté. Lorsqu'ils l'ont mentalement atteint, les sujets ouvrent la main pour signaler aux expérimentateurs la fin du mouvement imaginé. Les résultats indiquent que les temps de mouvements imaginés dépendent à la fois de la distance et de la largeur du pont. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une tâche de pointage, ce résultat reflète bien une relation entre vitesse et précision. La régression des temps de mouvements imaginés en fonction de l'indice de difficulté ($\text{Log}_2 (2d/w)$, en bits) indique d'ailleurs une tendance linéaire conformément au principe énoncé par Fitts (1954). Les auteurs concluent que l'imagerie motrice a des caractéristiques temporelles qui semblent spécifiques aux sorties motrices. Le processus par lesquels des images mentales du mouvement sont produites serait le même que celui par lequel les actions sont contrôlées.

Des résultats similaires sont obtenus dans une tâche plus proche de la situation classique de Fitts. Des cibles de tailles différentes placées à différentes distances sont présentées aux sujets. Pour chaque configuration les sujets doivent imaginer qu'il exécutent un mouvement d'aller et retour en cadence avec un métronome. La cadence pour laquelle les sujets ne parviennent plus à imaginer le mouvement représente la vitesse du mouvement. Lorsque les temps de mouvements correspondants sont représentés en fonction de l'indice de difficulté, la relation logarithmique prédite par la loi de Fitts est observée.

Enfin, il faut signaler les résultats de Decety, Jeannerod et Prablanc (1989). Les auteurs mesurent les durées mentales et réelles de mouvements de locomotion (en aveugle dans la situation réelle) vers des cibles (30*20 *cm*) située à 5, 10 et 15 mètres d'un point de départ. Les sujets du premier groupe ($n = 10$) regardent une des cibles définies par les auteurs pendant 5 *s*, et après 5 autres secondes (mise en place d'un bandeau sur les yeux), ils doivent, soit marcher réellement vers cette cible et s'arrêter lorsqu'ils pensent l'avoir atteinte, soit s'imaginer en train de marcher vers la cible et s'arrêter lorsqu'ils l'ont mentalement atteinte. Les sujets mesurent eux-mêmes les temps de mouvements imaginés et réels à l'aide d'un chronomètre. La corrélation des durées des mouvements de locomotion réels et imaginés des dix sujets de l'expérience et, pour

les trois distances testées, montre que les observations ($n = 30$) sont distribuées le long d'une droite : l'ordonnée à l'origine étant quasiment de zéro et la pente de 1. Encore une fois, les durées réelles et imaginées concordent. Cela n'est cependant pas toujours le cas.

Dans une seconde expérience, les mêmes auteurs font porter un lest de 25 kg aux sujets. Dans cette situation, les temps de mouvements imaginés augmentent considérablement (près de 30 %), alors que les temps de mouvements réels sont sensiblement les mêmes que dans l'expérience 1. La dissociation des durées mentales et réelles est donc entièrement expliquée par l'augmentation des temps de mouvements imaginés. Les auteurs proposent que cette augmentation pourrait être due à un accroissement général de la force produite pour porter la charge. Dans le cas du mouvement réel, cette force supplémentaire contribuerait à maintenir la même vitesse de locomotion alors que dans le cas des mouvements imaginés, et pour une raison qui reste à définir, elle se traduirait par la sensation d'un effort mental accru accompagné d'un accroissement de la durée du mouvement imaginé.

2.3 Conclusion

Dans leur ensemble, les travaux indiquent de très fortes corrélations entre les durées des mouvements imaginés et réels. Dans la plupart des études, les mesures sont mêmes quasiment identiques pour les deux modalités. De plus, les principes moteurs traditionnellement utilisés dans le domaine de la motricité humaine pour décrire les rapports entre les temps de mouvements et les contraintes spatiales de la tâche sont également valables pour les mouvements imaginés et ceci, même lorsqu'il s'agit de la relation entre vitesse et précision décrite par Fitts (1954). On pourrait en effet penser que cette relation implique une interaction effective avec l'environnement, qu'il faudrait être réellement en train de pointer pour que la précision soit une contrainte. Finalement, la représentation de l'effort nécessaire au mouvement, modulée par l'ajout d'une charge supplémentaire dans des tâches de locomotion, s'accompagne d'une dissociation entre les durées des mouvements réels et imaginés. Pour une raison inconnue, les durées des mouvements imaginés dans cette situation sont plus importantes que dans la situation de base.

3. RESUME

L'étude des images mentales motrices permet de tester les caractéristiques des représentations motrices lorsque celles-ci sont mobilisées non pas pour exécuter l'action mais pour l'imaginer. Les mesures de l'activité physiologique (musculaire, cardiaque, respiratoire) indiquent que ces deux situations ont beaucoup en commun. Imaginer une action qui demande un effort important se traduit par une augmentation de l'activité du système autonome, augmentation qui témoigne d'une réelle préparation de l'organisme à l'action. La neuroimagerie confirme que le mouvement imaginé mobilise de nombreux territoires communs à l'action et à sa simulation. L'étude comparée de cas cliniques indique que le cortex pariétal pourrait jouer un rôle clef dans la représentation des mouvements (en particulier de la main). L'atteinte de cette région s'accompagne d'une dissociation des performances mentales et réelles. Une dissociation entre durées réelles et mentales est également observée lorsque l'effort nécessaire pour un mouvement de locomotion est manipulée (les sujets portent un sac sur les épaules). Alors que dans la plupart des situations expérimentales — impliquant des mouvements de dessin, de pointage, d'écriture et de locomotion — les résultats indiquent une bonne correspondance des durées exécutées et imaginées, ces dernières sont considérablement allongées lorsque la représentation de l'effort à fournir est importante. Enfin, il faut rappeler que le principe d'isochronie, et la loi de Fitts — bien que les situations utilisées soient sensiblement éloignées des conditions originale d'observations de ces phénomènes — s'appliquent aux durées des mouvements imaginés.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont contribué au développement de la théorie de la simulation motrice (Jeannerod, 2001). Selon cette théorie, l'existence de territoires communs aux mouvements imaginés et réels témoigne de la présence d'un vaste réseau dont le rôle est de simuler l'action perçue. Nous allons revenir sur la notion de simulation, ainsi que sur d'autres perspectives théoriques susceptibles de fournir une explication des phénomènes décrits jusqu'ici, dans le chapitre suivant.

V. THEORIES ET MODELES DES RELATIONS PERCEPTION/ACTION

Dans les remarques introductives du 19^{ème} symposium « Attention et Performance » (2002) consacré à l'étude des mécanismes communs de la perception et de l'action, les éditeurs précisent que l'objectif de l'ouvrage est de « faire le point sur les aspects structurels et fonctionnels de l'architecture mettant en relation les traitements liés au stimulus et à la réponse » (Prinz & Hommel, 2002). Jusqu'à présent, et en particulier dans le chapitre consacré aux mouvements imaginés, nous avons suggéré que des représentations motrices, formées par les structures nerveuses, constituaient la base de ces relations. Autrement dit, ces structures engendreraient des représentations qui serviraient à la mise en relation des traitements liés à la perception et à l'action. Le monde se doublerait, ainsi, de représentations de lui-même au sein du système nerveux central. Dans cette perspective, la perception consisterait à établir des correspondances entre le monde physique et ses représentations. Nous avons vu qu'il était possible de distinguer les représentations mentales, subjectives, et les représentations « internes », objectives dans le sens où il s'agit de modèles au sens neural du terme. En fait, l'idée de représentation a considérablement évolué au cours des dernières décennies. Parallèlement à l'approche computo-symbolique, pour laquelle l'esprit traite de l'information et, plus précisément, manipule des symboles discrets, s'est développée une approche connexionniste, souvent dynamique. Pour celle-ci, la représentation est émergente, elle résulte de l'activité d'un système dynamique non-linéaire et témoigne de la capacité d'auto-organisation de ce système (Beer, 2000). La perspective dynamique est également adoptée par une approche incarnée (ou encore : éactive ou écologique) qui renonce, quant à elle, à l'idée de représentation. Dans cette perspective, les processus cognitifs eux-mêmes (et non plus seulement les représentations) sont qualifiés d'émergents. La perception, la mémoire ou les jugements seraient fondamentalement enchâssés dans un environnement qui les rendrait possibles.

Les différentes théories et modèles que nous allons présenter maintenant peuvent être, plus ou moins directement, mis en relation avec les trois perspectives générales que nous venons de citer brièvement. Ces théories et modèles visent à expliquer différents aspects des comportements humains. Certaines traitent la question de la conscience, d'autres celle de la reconnaissance visuelle, ou encore, de la cognition motrice ou du contrôle des trajectoires. Ces différentes approches ne sont pas, systématiquement, exclusives. Certaines se complètent, principalement parce qu'elles fournissent un système explicatif qui intervient à des niveaux différents de l'analyse du comportement. Quoi qu'il en soit, il s'agit moins dans ce chapitre de proposer une liste exhaustive que de voir comment les plus actuelles envisagent la question de la perception visuelle des mouvements humains, et plus précisément, la question de la préférence perceptive pour certaines caractéristiques de ces mouvements.

1. LA THEORIE DU CODAGE EVENEMENTIEL

La théorie du codage événementiel¹⁹ (Hommel, Müsseler, Aschersleben & Prinz, 2001) propose que les contenus de l'expérience perceptive (la perception ; le stimulus) et les schémas d'action (la partie planification de l'action ; la réponse) sont intégrés dans un cadre de référence commun : un code qui représente les caractéristiques distales d'un événement (figure 6, A). La théorie propose que les codes cognitifs qui représentent les objets perceptifs sont identiques à ceux qui représentent les schémas d'actions à partir du moment où ces deux codes font références aux événements extérieurs. Les codes proximaux (internes) permettant la contraction des muscles ne peuvent être mis directement en rapport avec les codes proximaux décrivant la pression d'un objet sur la surface des doigts, mais il existerait un niveau de représentation abstrait où ces codes sont intégrés ensembles. Le liage des différents traits dans les ensembles cohérents serait à la base de la représentation mentale de l'événement (figure 6, B).

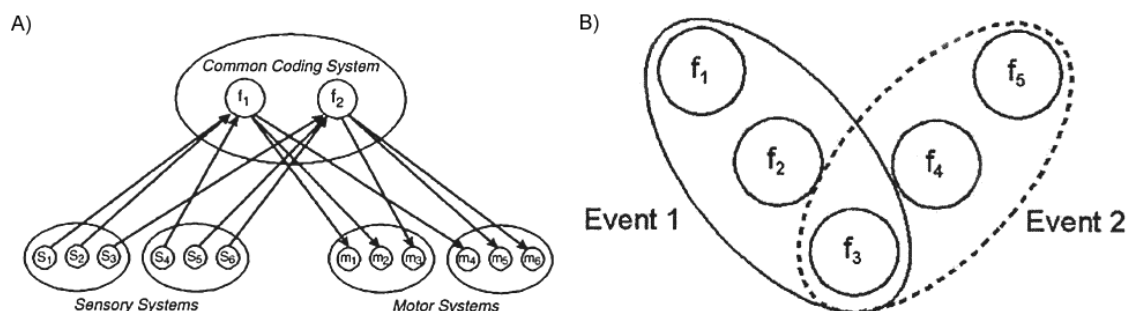


Figure 6. D'après Hommel et collaborateurs, 2001. A) Codage des traits. L'information sensorielle (code sensoriel) en provenance de deux systèmes sensoriels (S₁, S₂, S₃ et S₄, S₅, S₆) converge vers un système de codage commun, et active deux codes de traits abstraits (f₁, f₂). L'activation des codes abstraits se propage vers les systèmes moteurs (code moteur, m₁, m₂, m₃ et m₄, m₅, m₆). Les codes sensoriels et moteur font références à de l'information proximale, les codes de traits au niveau du système de codage commun font référence à de l'information distale. B) Intégration de codes de traits en représentation de l'événement. Les codes de traits activés par les stimulations externes ou par des processus internes sont liées dans deux événements différents. Dans l'exemple, les deux événements représentés ont deux traits uniques mais les deux événements (et donc leur représentation) partagent un trait commun (f₃). L'exemple donné dans le texte illustre les conséquences de ce chevauchement des représentations.

¹⁹ The Theory of Event Coding (TEC)

A un certain point de l'évolution, un nouveau domaine représentationnel, mettant en correspondance, la perception et la planification de l'action se serait imposé. Le code commun, dans un référentiel distal aurait été la solution sélectionnée. D'un point de vue plus spéculatif, les auteurs envisagent que l'invention de codes identiques pour les événements perçus et à-produire précède, et implique, la construction d'une réalité. La théorie n'envisage pas l'action et la perception indépendamment de l'intention (le but de l'action) ni de l'attention (la focalisation de l'acquisition d'information). Les intentions du sujet et le contexte de la tâche détermineraient, partiellement, la contribution des traits codés à la perception ou la production de l'événement. Cette contribution dépendrait essentiellement de l'intégration des différents traits activés, pondérés, en fonction de leur pertinence pour la réalisation de la tâche.

Les auteurs décrivent un ensemble d'effets de compatibilité stimulus-réponse qui n'ont pas été abordés jusqu'ici (Stoet et Hommel, 2002). Ces effets de compatibilité sont déduits de la comparaison des temps de réaction. Un processus de liages de traits pertinents, non-pertinents ou partiellement pertinents serait à l'origine des différences de TR. Imaginons la situation expérimentale suivante : le sujet voit un stimulus A (4 s) dont il doit mémoriser la couleur (rouge/vert), la forme (rond/rectangle) et la position sur l'écran (droite/gauche). Un écran blanc (2 s), un point de fixation (0.5 s), un blanc (0.5 s), et un stimulus B (X/H, centré, en lettre blanche, 0.2 s) sont ensuite présentés au sujet. Si le stimulus B est un X. Le sujet doit immédiatement lever l'index droit (ses mains sont posées à plat sur des plaques chronomètres reliées à l'ordinateur). Sinon il doit lever l'index gauche. Des questions concernant le stimulus A (couleur, forme, position) sont ensuite posées aux sujets. Les auteurs veulent savoir si le TR (reflétant la planification de la réponse B) est allongé lorsque le stimulus B (X ou H ; index droit ou gauche) partage une caractéristique spatiale commune avec le stimulus A (position droite ou gauche). Les résultats montrent qu'effectivement les TR sont plus importants lorsque le stimulus A et la réponse (B) ont une dimension commune (gauche/gauche ; droit/droit) que lorsqu'ils sont indépendants (gauche/droite ; droite/gauche). Les auteurs (Hommel et al, 2001) proposent que la construction de la représentation perceptive du stimulus A mobilise les traits (couleur, forme, position). Ces derniers ne seraient donc pas directement disponibles pour l'élaboration de la réponse B. Si celle-ci implique un

trait associé à A, il faut dissocier²⁰ ce trait de la représentation précédente pour pouvoir produire la réponse associée au stimulus B.

La théorie s'appuie sur l'existence des neurones visuo-moteurs décrits au chapitre 2. Ces neurones, qui rempliraient à la fois un rôle perceptif et moteur, sont considérés comme pouvant constituer la base neuroanatomique d'un code commun. Quoi qu'il en soit, que prédit la théorie lorsqu'il s'agit de choisir la vitesse que l'on préfère ? La présentation visuelle d'un événement dynamique va constituer une entrée sensorielle qui va activer des traits abstraits, qui vont être liés et représenter l'événement (le sujet voit un point qui se déplace). Au niveau des traits, l'activation se propage vers des codes moteurs. Le liage des traits associés à l'évènement (un point décrivant une trajectoire donnée) dépendra donc essentiellement de la correspondance du stimulus avec les codes proximaux (préalables à l'activation des codes distaux). Si cette correspondance est bonne, l'événement sera actualisé (perçu) en termes de représentation distales, elles mêmes impliquant l'activation de codes représentant la production de cet événement. Mais peut-on prédire l'impact de l'activation des codes sur la préférence, donnée essentiellement subjective ? En fait la théorie n'aborde pas cet aspect de notre expérience.

²⁰ Délier, « undo the old, now invalid and misleading binding before the new one can be formed », Hommel et al, 2001, pp 866).

2. UNE EXPLICATION SENSORI-MOTRICE DE LA CONSCIENCE VISUELLE

Alors que la TEC est directement dépendante de la notion de représentation (le cerveau construit une représentation du monde), l'approche développée par O'Regan et Noë (2001) fait l'économie de cette hypothèse et se rapproche, en cela, de la perspective incarnée. Les auteurs proposent que voir est la conséquence d'une maîtrise des contingences sensori-motrices, c'est-à-dire, des règles qui décrivent les changements des entrées sensorielles résultants de l'action. Ces contingences sensori-motrices peuvent être induites soit par les caractéristiques du système visuel, soit par les attributs de l'objet. Les premières sont spécifiques de la modalité sensorielle considérée (vision, audition...) et peuvent être décomposées en deux sous-classes selon que c'est la structure de l'appareil visuel, ou la structure 3D du monde qui est à l'origine des changements. Les secondes dépendent plus fondamentalement de la nature de l'objet présent dans l'environnement (forme, taille, texture...). Les premières formeraient les bases de la sensation visuelle et les secondes celles de la perception visuelle. Les deux notions sont distinguées comme suit : la sensation est la façon dont les sens sont affectés par un stimulus (le pattern particulier d'activité lié à la stimulation des récepteurs) et la perception est la catégorisation des objets et des événements dans l'environnement. Les arguments sont les suivants : les contingences sensori-motrices induites par les caractéristiques du système visuel sont spécifiques de ce système. En ce sens elles définissent spécifiquement la sensation de voir. En revanche, les contingences sensori-motrices induites par les caractéristiques des objets et des événements définissent spécifiquement ces derniers. C'est la maîtrise de ces contingences qui constituerait la perception, c'est-à-dire la reconnaissance de l'objet. Pour finir, les auteurs abordent la question de la conscience visuelle à travers la notion d'« awareness » qu'il faut entendre comme « la conscience de quelque chose de particulier ». Lorsque les sensations et les perceptions — qui sont l'exercice de contingences sensori-motrices — sont intégrées (dans les buts, la pensée et le langage de l'individu) le sujet est transitivement conscient (« aware ») de ce qui est perçu. Dans l'interaction du sujet et de l'environnement, la maîtrise des contingences sensori-motrices inhérentes à la situation, et pertinentes compte tenu des objectifs (intentions) du sujet, constituerait l'essence même de l'expérience consciente. Les auteurs distinguent également, ce que l'on pourrait appeler un niveau méta-conscient, une conscience visuelle générale : la conscience d'être capable de pouvoir devenir transitivement conscient des caractéristiques de la scène.

Pour résumer cette approche, il faut saisir que voir ne consiste pas à mettre en relation des représentations du monde et des stimuli, mais à explorer l'environnement d'une façon qui est définie par la maîtrise des contingences sensori-motrices et en ayant conscience d'être en train d'utiliser cette maîtrise, compte tenu de ses buts, dans le raisonnement et le langage. Nous disions que cette perspective faisait l'économie de la notion de représentation. Pourtant, la maîtrise des contingences sensori-motrices semble impliquer une forme de connaissance (la connaissance de ce qui se passe lorsque je bouge, ou lorsqu'un objet est manipulé). Cette idée de connaissance pourrait donc impliquer une forme de représentation. Toutefois, les connaissances en questions ne sont pas propositionnelles mais pratiques. L'expérience continuelle des contingences sensori-motrices permettrait au cerveau d'extraire (de maîtriser) un ensemble de règles, les lois du changement. C'est l'actualisation (l'utilisation) de ces dernières qui constituerait l'expérience perceptive. Toute déviation par rapport à ces lois (causées par une modification interne au sujet, ou encore, par une modification des lois dans l'environnement), brisant l'équilibre établis par les contingences, entraînerait une modification de la perception de l'objet ou de l'évènement et serait à l'origine de l'impression consciente que quelque chose d'inhabituel, d'insaisissable, se produit.

Ce dernier point est intéressant pour notre recherche. Ce serait la correspondance entre ce qui est vu et ce qui a déjà été vu — en ce sens que les lois qui décrivent les changements sont les mêmes maintenant que ce qu'elles étaient avant — qui déterminerait l'expérience perceptive. La qualité de cette expérience devrait être expliquée activement : par la capacité de l'observateur à explorer et interagir avec le stimulus. Fondamentalement, l'impression donnée par le stimulus, c'est-à-dire l'expérience, subjective, qui en est faite par l'observateur, serait dépendante des contingences sensori-motrices. Les travaux de Viviani et Stucchi (1992a) sur l'estimation subjective de l'uniformité peuvent très bien être interprétés dans ce cadre. Les stimuli n'obéissant pas à la loi de la puissance $2/3$ ne sont pas en accord avec les principes extraits par l'expérience des contingences sensori-motrices et ce serait justement à cause de ce désaccord de la règle et du stimulus qu'une impression de non-uniformité est rapportée par les sujets. L'idée de ces règles comme connaissances pratiques semble très proche de l'idée de connaissances implicites qui forment la base d'une autre approche (un modèle fonctionnel) de la perception visuelle des événements dynamiques.

3. UN SCHEMA FONCTIONNEL DES INTERACTIONS PERCEPTIVO-MOTRICES

L'approche développée par Viviani (2002), propose que la perception des événements dynamiques implique l'insertion des informations sensorielles dans un ensemble de contraintes dérivées de nos compétences motrice. Cette approche partage avec la conception précédente la notion de règles, quoique celles-ci soient plutôt envisagées comme des contraintes. Toutefois, dans la mesure où la règle définit ce qui lui obéit (ce à quoi s'applique la règle) on peut l'envisager comme limitant, contraignant, la forme que peuvent prendre les événements dynamiques. Les contraintes imposées à la perception des événements dynamiques dépendraient pour une part des lois qui gouvernent l'environnement et, d'autre part, de lois plus spécifiques qui reflèteraient des contraintes imposées par le fonctionnement du système nerveux. On peut penser que ces dernières, au cours de l'évolution, ont sans doute dérivé de l'influence des premières, mais elles possèdent un statut à part parce qu'elles reflètent une organisation qui répond à une nécessité adaptative. La capacité de produire et percevoir du langage et la capacité d'interpréter les expressions faciales sont cités par l'auteur comme exemple de bagage encodé dans la structure des systèmes perceptif et moteur.

Dans un article de synthèse récent (Viviani, 2002) l'auteur suggère : 1) qu'il existe un ensemble de connaissances implicites dérivées de nos compétences motrices et 2) que ces connaissances constituent un cadre de référence pour interpréter les événements dynamiques. Selon l'auteur, le modèle qui semble le plus approprié pour interpréter ce type d'information est le modèle biologique, c'est-à-dire celui correspondant à nos compétences motrices. Le système perceptif serait contraint d'interpréter les informations sensorielles concernant les événements dynamiques dans le cadre de ce modèle. Nous dirons que le modèle biologique est prégnant.

Nous avons déjà donné des exemples en liens avec cette perspective dans le chapitre II (loi de la puissance 2/3). Ici nous allons plus particulièrement développer un schéma fonctionnel (spéculatif comme le précise l'auteur) basé sur la notion de résonance développée en Psychologie par Gibson (1979). Cette notion est généralisée pour prendre en compte la non-linéarité (oscillateurs) et la possibilité de couplage entre des ensembles d'oscillateurs. La perspective adoptée par l'auteur est très clairement celle d'une approche dynamique des relations entre perception et action.

Dans la figure 7, deux ensembles d'oscillateurs hiérarchiquement organisés, sont représentés. Ils contribuent à la genèse des percepts et à l'organisation des actions. Les

systèmes dynamiques (oscillateurs) ont des cycles limites de telle sorte que le système converge, au cours du temps, vers des bassins d'attraction²¹.

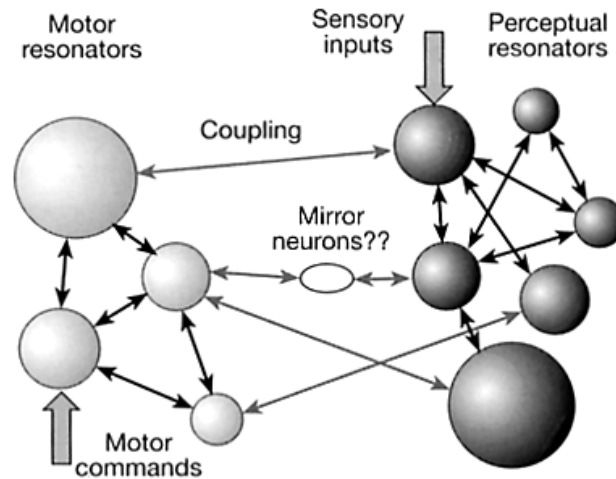


Figure 7. D'après Viviani, (2001). Deux ensembles d'oscillateurs, hiérarchiquement organisés sont représentés. Ils contribuent à la genèse des percepts et à l'organisation des actions. L'auteur suggère que les composantes de chaque ensemble pourraient être couplées, de même que les composantes des différents ensembles. Certains de ces couplages sont génétiquement déterminés et d'autres acquis. Quoi qu'il en soit, ces couplages intègrent et organisent l'activation des composantes individuelles. Les neurones miroirs pourraient constituer l'interface mettant en relations des oscillateurs moteurs et perceptifs.

Les résultats concernant l'estimation subjective de l'uniformité (Viviani et Stucchi, 1992a) peuvent être interprétés dans ce cadre conceptuel. La perception des stimuli s'accompagne de la convergence vers des cycles limites (le mode résonant) des oscillateurs de l'ensemble perceptif. Dans le cas où la valeur de l'exposant β est égale à $1/3$, le mode résonnant des oscillateurs de l'ensemble perceptif est renforcé par les oscillateurs de l'ensemble moteur qui sont accordés, et donc entraînés, sur ce mode. Pour une raison qui reste à définir, l'équilibre établi entre les deux ensembles s'accompagnerait d'un vécu subjectif d'uniformité. A partir du schéma proposé par Viviani (2002) il est possible d'envisager que la préférence perceptive puisse traduire un accord des différents ensembles d'oscillateurs. La vitesse vers laquelle convergerait les sujets serait celle pour laquelle l'ensemble d'oscillateur moteur est le plus susceptible d'être entraîné et, par là même, de renforcer le mode résonnant de l'ensemble perceptif.

²¹ Dans une perspective dynamique, nous pouvons imaginer que les attracteurs, qui déterminent la formation de ces bassins, sont à l'origine des connaissances implicites que nous avons de notre propre motricité (voir *Chaos, chaotique*).

4. LA THEORIE DE LA SIMULATION MOTRICE

Les théories présentées jusqu'ici accordent une part plus ou moins grande aux bases neurales des relations entre la perception et l'action. Cet aspect du problème est plus directement abordé dans la théorie de la simulation motrice développée par Jeannerod (2001). La théorie de la simulation motrice propose que le système moteur est partie intégrante d'un ensemble neuronal qui est activé dans un grand nombre de situations impliquant l'action, que celle-ci soit intentionnellement planifiée par le sujet ou observée sur autrui. Cette activation témoignerait de l'existence d'un processus de simulation dont la fonction ne serait pas seulement de préparer le système pour l'action mais aussi de donner au sujet de l'information sur le sens et la faisabilité d'actions potentielles.

La théorie de la simulation partage avec les perspectives précédentes l'idée que le système moteur participe activement à la perception. L'approche s'appuie sur les résultats concernant le mouvement imaginé et sur les travaux dans le domaine de la neurophysiologies et de la neuroimagerie que nous avons abordé précédemment. L'auteur précise que l'action doit être envisagée dans un continuum, de l'intention à l'exécution. Cette dernière étape²², la plus visible, explicite, « déclarée » pour traduire l'expression « overt stage », employée par l'auteur, s'inscrit dans la continuité d'un ensemble d'étapes cachées qui représentent le but de l'action, les moyens d'atteindre ce but et les conséquences (sur l'environnement et l'organisme) de l'action envisagée. Ce continuum reste, normalement, sous le contrôle volontaire du sujet qui peut simuler l'action (en reconstruire les aspects cachés), sans pour autant l'exécuter. La possibilité de ce contrôle volontaire (manifeste dans les situations de mouvements imaginés) n'empêche pas pour autant cet ensemble neuronal de simuler, d'une manière automatique (inconsciente), les aspects cachés des actions rendues potentielles par le contexte. Le système se tient toujours prêt, en quelque sorte, à utiliser de l'information pour l'action. Plus encore, la simulation servirait de support pour la cognition (voir l'interprétation faite de la corrélation entre TR et degré de rotation dans le chapitre IV,

²² Il existe une ambiguïté inhérente à la traduction française de l'anglais « stage ». Le terme renvoie, pour les sens pertinents dans notre cas, soit à la scène, soit à l'étape. Nous emploierons le terme étape plus conventionnel, bien que scène puisse paraître le plus approprié dans la perspective d'un continuum.

référence). Un dernier point concerne la double nature (implicite et explicite) des images motrices (Jeannerod & Frak, 1999). Jusqu'à présent, et en partie dans la section consacrée aux mouvements imaginés, les images motrices étaient explicites (conscientes), ici nous notons que ces dernières ne sont que la partie émergente d'un ensemble d'images motrices implicites (inconscientes).

La théorie de la simulation motrice développée par Jeannerod (2001) est enchâssée dans le cadre global des théories de la simulation et en particulier dans la version « motrice » développée par Gallese et Goldman (1998) sur la base de la découverte des neurones miroirs (cf. section II.1.3). En fait, dans la perspective générale d'expliquer la mentalisation, c'est-à-dire le développement de la capacité d'attribuer à autrui des états mentaux (intentions, désirs, croyances), on peut opposer les théories de la simulation aux théories « théorique ». Pour expliquer comment un enfant parvient à attribuer des états mentaux et à identifier le contenu des états mentaux d'autrui, la première approche propose que l'enfant simule le point de vue d'autrui et utilise le contenu de cette simulation pour comprendre et prédire les comportements, la seconde approche, en revanche, propose que l'enfant construit une théorie en formulant des hypothèses et explique et comprend le comportement d'autrui sur la base de son expérience acquise (Proust, 2000). Comme l'indique les définitions, la nuance entre ces deux théories de l'esprit tient essentiellement dans la distinction entre connaissances procédurales et déclaratives. Un autre aspect essentiel de la théorie de la simulation motrice est son lien avec les théories de l'évolution²³. La psychologie évolutionniste insiste sur l'importance adaptative de la vision chez les hominidés. Le jeu de la sélection naturelle aurait conduit au développement d'un système représentationnel destiné à lire les états mentaux d'autrui à partir des mouvements du corps, et en particulier, du visage.

²³ Jusqu'ici nous avons adopté la théorie neutraliste développée par Kimura (1980). Dans cette théorie, la sélection est négative. Dans le cas de la théorie de la simulation motrice la perspective théorique sur l'évolution adoptée est généralement celle proposée par Darwin (Decety, 2000). Dans cette théorie, en revanche, la sélection est positive.

Il faut préciser que la théorie de la simulation motrice (Jeannerod, 2001) n'insiste pas sur ces liens. L'accent est mis sur les situations pour lesquelles la simulation motrice est opérante, sur le rôle de cette simulation pour la « cognition motrice ». Quoi qu'il en soit, en admettant qu'un processus de simulation soit automatiquement mis en route par la perception visuelle d'un simple point se déplaçant sur un écran — ce qui est d'autant plus probable que la relation entre le mouvement présenté et l'action est rendue évidente, comme dans le cas du mouvement imaginé — la théorie de la simulation prédit une quasi-équivalence, en terme d'activité neurale, entre l'action simulée et l'action exécutée. La préférence perceptive des sujets pourrait ainsi refléter les caractéristiques de l'exécution de l'action correspondante. Dans cette perspective, il s'agirait maintenant de caractériser l'action pour prédire les préférences perceptives. Dans ce but, nous allons rapidement aborder une approche computationnelle de la planification, du contrôle et de l'apprentissage des mouvements.

5. PLANIFICATION, CONTROLE ET APPRENTISSAGE DES MOUVEMENTS

Nous venons de voir que l'exécution des actions s'inscrit dans la continuité d'un ensemble d'étapes cachées qui représentent le but de l'action, les moyens de l'atteindre et les conséquences (sur l'environnement et l'organisme) de cette même action. Récemment, les neurosciences du mouvement ont proposé un modèle computationnel de ce continuum (Wolpert & Ghahramani, 2000). Les questions centrales qui fondent les neurosciences du mouvement sont : comment la tâche détermine le comportement moteur ? Comment les commandes motrices se constituent-elles ? Comment l'état du système et le contexte de la tâche sont estimés ? Ou encore, comment les modèles internes sont représentés ? Ce dernier point est central dans ces approches qui se basent sur le concept de modèles internes pour aborder la planification, le contrôle et l'apprentissage moteur. Ces modèles sont utilisés soit pour prédire les conséquences sensorielles et dynamiques de l'action, soit pour construire, en fonction des conséquences désirées, la commande appropriée. Fonctionnant en parallèle, ces modèles forment une boucle sensori-motrice, de la formation de la commande motrice au retour sensoriel en passant par le changement d'état du système.

Deux aspects de cette approche sont particulièrement intéressants pour notre recherche. Le premier aspect est que cette approche est d'abord développée pour modéliser l'imitation des actions (Wolpert & Kawato, 1998), et, plus récemment, les interactions sociales, en particulier, la représentation des états internes d'autrui (Wolpert, Doya & Kawato, 2003). L'inférence Bayésienne basée sur la règle de probabilité des causes de Bayes et la notion d'observateur (comparateur des états prédits et actuel) forment la base de la sélection et du contrôle des commandes motrices. Étendues aux situations d'observations, ces mêmes principes de sélection et de correction amènent les auteurs à proposer qu'une architecture modulaire de sélection et d'identification pour le contrôle des actions (MOSAIC model ; Haruno, Wolpert & Kawato, 2001) comportant plusieurs niveaux hiérarchiques (H-MOSAIC ; Wolpert et al, 2003) permettrait d'obtenir plusieurs niveaux de représentation de l'action observée. Les auteurs distinguent un bas niveau (cinématique de l'action), un niveau intermédiaire (séquences d'actions) et un niveau supérieur (but de l'action). La propagation de l'activation à différents niveaux de hiérarchie dépend de la correspondance entre le phénomène observé et le modèle H-MOSAIC de l'observateur. Dans le cas

d'interactions sociales, l'interprétation de l'action d'autrui dépendra du niveau de correspondance des structures H-MOSAIC des individus.

Le second aspect intéressant pour notre recherche concerne le concept de bruit dans les systèmes neuronaux. Nous avons rapidement évoqué les modèles de formation des trajectoires au chapitre II (section 2.2). Ces modèles cherchent à expliquer les caractéristiques des mouvements humains, à partir des contraintes inhérentes au système d'exécution. Dans le modèle « minimum variance » par exemple, les auteurs proposent que le déterminant de la planification des trajectoires est, la nécessité de minimiser la variance de la position de l'effecteur (le bras ou l'œil par exemple) sous la contrainte fonctionnelle d'un bruit neuromoteur proportionnel à l'amplitude du signal de commande (Harris et Wolpert, 1998). L'existence d'un bruit dans le signal de commande est confirmé par un ensemble de travaux (van Galen et van Huyenvevoort, 2000). Ce bruit, qui représente la dispersion de l'activité des motoneurones, dépend de l'intensité du signal de commande. Les coefficients de variation seraient compris entre 10 et 25 %.

Il ne fait aucun doute que la précision des mouvements constitue un pré-requis pour la survie d'un individu. La présence d'un bruit inhérent à la commande motrice produit des déviations du mouvement qui s'écarte alors de l'objectif désiré (attraper un fruit par exemple). Ces déviations s'accumulent pendant toute la durée du mouvement. Toutefois, le mouvement le plus rapide n'est pas celui qui minimise la variance car le bruit neuro-moteur est justement dépendant de l'intensité de la commande motrice. Pour permettre un comportement moteur adapté, le système de contrôle doit optimiser le rapport entre la vitesse (durée) et la précision (de la position finale) des mouvements. L'implémentation du modèle permet de prédire la plupart des principes moteurs observés chez l'humain (loi de Fitts, loi de puissance $2/3$). Le modèle permet également de déduire la forme des trajectoires et les profils de vitesse pour des mouvements d'effecteurs aussi différents que le bras et l'œil. Pour finir sur la question du bruit comme contrainte inhérente aux systèmes neuronaux, gardons à l'esprit que le bruit serait aussi une contrainte imposée aux systèmes sensoriels. Le bruit dans le signal visuel par exemple pourrait déterminer le niveau d'activation et les modules sélectionnés du modèle H-MOSAIC de l'observateur et ainsi, l'interprétation qui est faite du mouvement.

6. RESUME

Les théories et les modèles présentés ont été développés sur des bases théoriques plus anciennes qui portaient déjà en elles les concepts centraux de ces nouvelles formulations. Nous voulons souligner que les changements fondamentaux sont plus le fait de l'irruption de perspectives dynamiques au sein des sciences cognitives que de modifications dans la façon d'aborder les relations entre la perception et l'action. L'influence des concepts issus de la théorie des systèmes dynamiques est, en effet, grandissante (Beer, 2000). Il faut souligner, par ailleurs, l'existence d'une approche dynamique de la conscience (Thompson et Varela, 2001) qui accorde un rôle fondamental aux ensembles neuronaux « résonnants » et à l'intégration de leurs activités (par la synchronisation de phase de ces groupes) sur de larges échelles (distance spatiale des zones synchrones au niveau du cerveau). Enfin, d'autres approches mettent l'accent sur la dissociation entre la voie ventrale et la voie dorsale, entre une perception pour l'action et une perception pour la cognition (Norman, 2003) ou encore, sur l'intégration des concepts dérivés des systèmes du contrôle de l'action (modèles prédicteurs), du traitement du signal et de la théorie de la simulation (Grush, 2003) pour expliquer les résultats comportementaux que nous avons présentés tout au long de cette partie théorique.

Dans leur ensemble, ces théories proposent que la motricité contribue activement à la perception. Certaines d'entre elles admettent même la possibilité de relations entre jugements perceptifs et motricité. Nos jugements pourraient ainsi refléter l'influence de contraintes motrices. Cette perspective semble évidente dès qu'il s'agit de percevoir des stimuli non-biologiques. Ces derniers sont si mal interprétés par le système visuel qu'il est raisonnable d'admettre que ce système est dépendant de la présence, dans le signal visuel, d'indices caractéristiques des mouvements biologiques.

Que peut-on attendre des réponses des sujets lorsque la vitesse moyenne de stimuli biologiques peut être modulée ? Les travaux de Gièse & Lappe (2003), présentés dans la section II.1.1, permettent de supposer que les sujets devraient choisir des vitesses « naturelles » pour ces mouvements, c'est-à-dire des vitesses qui sont habituellement associées aux mouvements humains. Toutefois, ces vitesses « habituellement associée à » doivent-elles être envisagées comme la conséquences d'une extraction, par le système visuel, des régularités observées dans l'environnement ou bien comme le résultat d'une mise en perspective, de ce qui est vu avec notre propre expérience motrice ? Nous allons voir que les réponses des sujets, leurs préférences perceptives, pourraient nous permettre d'en savoir plus sur le degré d'accord de la perception et de la motricité ?

TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Les travaux précédents nous ont permis de dessiner les contours d'une notion un peu particulière : « la préférence perceptive ». Cette expression a été, indifféremment, utilisée pour qualifier un certain nombre de phénomènes. Le choix quasi systématique de la valeur $\beta = 1/3$ pour définir une vitesse uniforme (Viviani et Stucchi, 1992a) mais aussi la préférence pour le chemin le plus long (Shiffrar & Freyd, 1990) ou encore, le tempo préféré (Iwanaga et Tsukamoto, 1998 ; Moelants, 2002) peuvent être cités comme exemples. En fait, nous pouvons parler de préférence parce que dans ces expériences, certaines réponses sont plus probables que d'autres. Lorsque β , l'ISI, ou le tempo sont variés et qu'un jugement est demandé, ou encore, lorsque le sujet contrôle directement les variables en questions: les réponses sont distribuées autour de certaines valeurs de ces variables ($1/3$; 550 ms ; 120 bpm). Ces valeurs constituent des références d'un point de vue moteur, et ce sont justement celles que nous préférons. En étudiant les relations entre perception et action, nous constatons que la formation d'impression sur le monde, les jugements que nous formulons sur ce qu'il contient ou encore, ce que nous imaginons, sont tributaires de notre motricité.

La critique qui est traditionnellement associée à l'approche cognitive des phénomènes mentaux est, qu'elle échoue à rendre compte du mental, défini comme les contenus de l'expérience et de la conscience. Dans la perspective d'une contribution active de la psychologie cognitive à l'étude scientifique des activités mentales (phénomènes de l'esprit, de la pensée) et du comportement, nous voulons étudier ces contenus de l'expérience et de la conscience, ces « données phénoménologiques » (Petitot et al, 2002). En fait, nous pensons que la *subjectivité* — si par subjectivité on entend la façon dont les choses sont perçues du point de vue du sujet — subit une influence latente de la motricité, en particulier lorsqu'il s'agit de juger des stimuli dynamique.

Nous pensons que cette influence latente de la motricité sur la perception peut être révélée par l'étude des préférences perceptives. Dans cette partie expérimentale, nous défendons une approche qui est, au départ, fondamentalement exploratoire. Nous voulons savoir si les sujets attribuent une vitesse de référence au déplacement d'un point sur un écran. Dans le même temps, nous tenterons d'isoler les variables pouvant déterminer cette préférence. Compte tenu de ces objectifs, la méthode utilisée doit permettre de mesurer avec précision la durée, et donc la vitesse moyenne, des stimuli préférés par les sujets.

Avant d'aborder la question de la préférence perceptive pour les vitesses, nous allons présenter les résultats d'une expérience utilisant la tomographie par émission de positons, ceci dans le but de mettre en évidence les aires corticales intervenant lors de la perception visuelle des mouvements séquentiels d'écriture et de pointage. Ces corrélats neuro-anatomiques ont été identifiés récemment par notre équipe en collaboration avec l'INSERM U 318 (Chaminade, Méary, Orliaguet, & Decety, 2001).

Les parties expérimentales suivantes traitent plus directement la question de la préférence perceptive. Nous vérifierons si les sujets ont une tendance à attribuer une vitesse de référence pour le déplacement d'un point ayant une trajectoire et une loi du mouvement donné. Nous utiliserons également une consigne de mouvement imaginé afin de tester l'effet de la mise en correspondance explicite du mouvement présenté et de la motricité humaine. Par la suite, l'effet de la longueur et de la forme des stimuli dynamiques sera étudié afin de vérifier si la vitesse préférée, ou plus précisément sa modulation, révèle l'existence au plan perceptif de lois similaires à celles qui décrivent l'exécution des mouvements humains. Les aspects temporels de la production et de la perception des mouvements seront directement comparés. A l'issue de cette expérience nous présenterons les résultats d'une étude exploratoire mettant en relation la variabilité spatiale tolérée et la durée des mouvements de tracés d'ellipses. La propension à attribuer aux stimuli dynamiques les caractéristiques temporelles des mouvements humains sera également testée chez les enfants de 7, 9 et 11 ans. Enfin, la dernière partie expérimentale sera consacrée à l'étude de la perception visuelle des mouvements humains chez des patients atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson. Nous verrons que cette neuropathologie, à dominante motrice, constitue un modèle particulièrement adapté pour l'étude de la préférence perceptive.

VI. ANTICIPATION PERCEPTIVE ET IMAGERIE CEREBRALE

Les études de neuroimagerie indiquent que des aires corticales et sous-corticales, dont le rôle fonctionnel était traditionnellement considéré comme essentiellement moteur, sont aussi activées par l'exécution mentale et l'observation des actions. Les résultats issus de la neuroanatomie et de la neurophysiologie suggèrent que ces activations sont dues à l'existence de boucles cortico-corticales reliant des aires pariétales, impliquées dans le traitement du signal visuel, et des aires préfrontales, impliquées dans la planification des actions. Ces résultats jouent un rôle central dans le cadre de la théorie de la simulation motrice (Jeannerod, 2001). Cette théorie propose que la perception d'actions ou d'objets manipulables entraîne une simulation neurale intériorisée de l'action perçue.

Dans cette expérience, nous allons mesurer le débit sanguin cérébral de sujets humains engagés dans des tâches d'anticipation perceptive de mouvements séquentiels d'écriture et de pointage. Nous avons abordé la question de l'anticipation motrice et de l'anticipation perceptive dans la section II.3. Pour résumer le phénomène d'anticipation perceptive, nous pouvons dire que le système visuel est capable de saisir dans les mouvements humains des indices cinématiques qui permettent aux sujets d'anticiper sur l'action en cours, en l'occurrence, de prédire la fin de mouvements d'écriture et de pointage. Compte tenu de la spécificité des indices extraits, il est tentant de supposer que cette compétence perceptive s'appuie sur une simulation motrice intériorisée, c'est-à-dire sur l'activation de structures motrices participant à la préparation, la planification et l'exécution des mouvements d'écriture et de pointage. Les réseaux impliqués par les mouvements d'écriture et de pointage sont relativement distincts. L'anticipation perceptive de ces deux types de mouvements, si elle nécessite une simulation motrice, devrait donc activer des réseaux distincts.

1. METHODE

Dans cette expérience, nous allons mesurer le débit sanguin cérébral de sujets humains engagés dans des tâches d'anticipation perceptive de mouvements séquentiels d'écriture et de pointage. Une condition d'anticipation du déplacement d'une balle, initialement mue par un ressort est utilisée pour isoler les aires activées par la perception des mouvements d'écriture et de pointage. Une condition de base, sans anticipation, est ajoutée pour mesurer l'activité corticale associée à l'utilisation du dispositif expérimental

1.1 Sujets

Huit volontaires, droitiers, âgés de 18 à 28 ans participèrent à l'expérience après avoir donné leur consentement pour un protocole approuvé par le comité d'éthique du centre Léon Bérard (Lyon). Les sujets étaient rémunérés pour leur participation. Tous les sujets avaient une vue normale ou corrigée vers la normale. Un sujet supplémentaire, non rémunéré, participe à la phase d'enregistrement des stimuli.

1.2 Préparation des stimuli

Les stimuli pour les conditions d'anticipation perceptive, portant sur des mouvements séquentiels de pointage (anticipation pointage, AP) et d'écriture (anticipation écriture, AE), sont basés sur des mouvements réels, exécutés par le participant additionnel. Les mouvements sont enregistrés par l'intermédiaire d'une tablette graphique (Wacom® Intuos™ A3 ; échantillonnage, 200 *Hz* ; résolution spatiale, 0.2 *mm*).

Les mouvements séquentiels d'écriture et de pointage comprenaient deux composantes. Pour les mouvements de pointage (condition AP) la première composante était dirigée vers une cible de 1.5 *cm* de diamètre, située à une distance de 25 *cm* d'un point de départ, et la seconde vers une petite (0.5 *cm*) ou une grande (2 *cm*) cible placée, perpendiculairement, à 20 *cm* sur la droite. Les deux composantes devaient être enchaînées sans pause. Pour les mouvements d'écriture (condition AE) le volontaire devait tracer, en écriture cursive, les digrammes « *ll* » et « *ln* ». Une vingtaine de mouvements étaient enregistrés dans chaque cas.

Conformément aux résultats des études portant sur l'anticipation motrice (Orliaguet et al, 1997 ; Louis-Dam et al, 1999), l'analyse de la cinématique de la première composante révèle que la seconde composante — « petite » ou « grande » cible finale pour la condition AP et lettre « l » ou « n » dans la condition AE — influence la cinématique de la première composante, c'est-à-dire, le profil de vitesse du mouvement de pointage vers la cible intermédiaire pour AP (Fig. 8 A et B) et le profil de vitesse du mouvement d'écriture de la première lettre pour AE (Fig. 8 C et D).

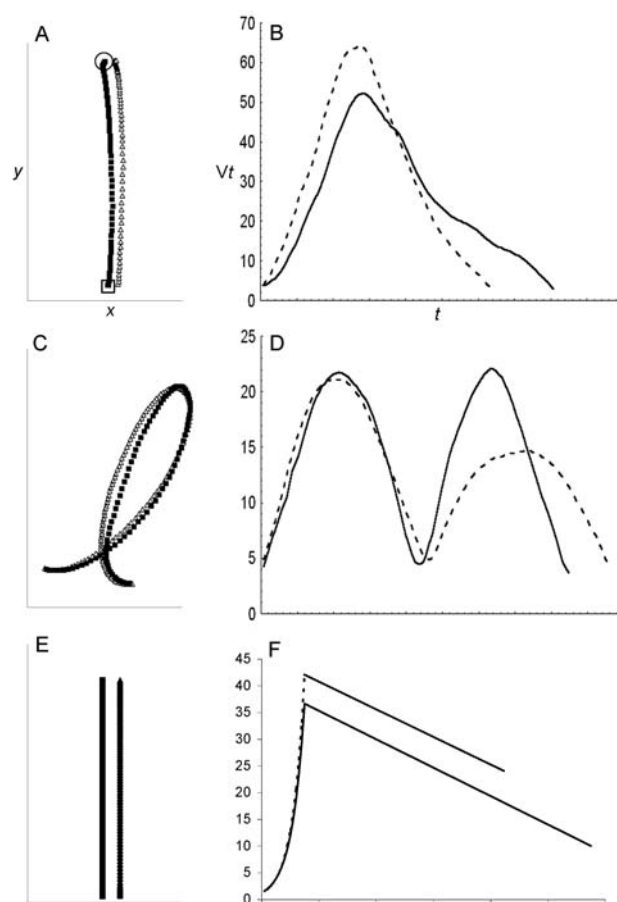


Figure 8. Trajectoire et profil de vitesse tangentielle des stimuli présentés dans les trois conditions expérimentales. De haut en bas : pointage, écriture et objet. Les trajectoires des deux exemplaires présentés sont décalées sur l'axe x pour plus de clarté. Pour les conditions pointage et écriture, un stimulus représentatif des 11 exemplaires sélectionnés est présenté. A) Trajectoire de la première composante d'un mouvement de pointage séquentiel. Le point de départ et la cible sont présents pour tous les pointages lors de l'expérience. Si la seconde composante implique un mouvement vers une cible de 0.5 cm , la première composante (carré) a un profil de vitesse (B, ligne pleine) marqué par une relativement longue phase de décélération. C) La trajectoire du premier « l » du digramme « ll » (carré) s'accompagne d'un profil de vitesse (D, ligne pleine) quasiment symétrique pour les parties montantes et descendantes de la trajectoire (upstroke et downstroke). E) La trajectoire du point dans la condition AO est rectiligne. Selon l'accélération initiale (F) le point peut aller plus ou moins loin après le rebond sur la bande (non figurée).

Dans la condition AP, la durée de la première composante est plus importante lorsque la cible finale est « petite » ($TM = 0.885 \pm 0.039 \text{ s}$) plutôt que « grande » ($TM = 0.748 \pm 0.035 \text{ s}$). Cette augmentation de TM est essentiellement due à l'allongement de la phase de décélération. Dans la condition AE, la durée de la première lettre « *l* » est plus courte dans la séquence « *ll* » ($TM = 0.846 \pm 0.026 \text{ s}$) que dans la séquence « *ln* » ($TM = 0.965 \pm 0.032 \text{ s}$). L'essentiel des différences de cinématique apparaît durant la partie descendante (downstroke) du « *l* ». Pour chaque mouvement, la première composante est isolée. Onze exemplaires différents des premières composantes des 4 mouvements enregistrés, représentatifs de la performance moyenne observée lors de l'exécution, ont été sélectionnés. Cette procédure préserve la variabilité naturellement présente dans les mouvements de pointage et d'écriture.

Pour la situation impliquant l'anticipation perceptive du déplacement d'une balle (anticipation d'objet, AO), nous avons simulés deux cinématiques (figure 8, E et F). Le mouvement simulé ressemble à celui d'une boule de billard. Selon l'impulsion initiale (le mouvement est uniformément décéléré), la balle se déplace plus ou moins rapidement. La même longueur de trajectoire est simulée (20 cm) et le déplacement de la balle dure 0.85 s ou 1.15 s. Cette situation est un cas de mouvement non biologique. Enfin, dans une condition de base (B), un point apparaît en bas ou en haut de l'écran pendant une durée de 0.9 s.

1.3 Procédure

Le sujet était allongé sur un tapis mobile et placé dans le champ de la caméra. Les stimuli (Figure 8) étaient présentés sur ordinateur et projetés sur un miroir situé à 40 cm au-dessus du sujet couché. Le déplacement du point ($\varnothing = 0.8 \text{ cm}$) sur un fond blanc (22 x 22 cm) ne laissait pas de trace. Les stimuli ne comprenaient que la première composante des mouvements. La tâche consiste à prédire la suite du mouvement présenté. Dans tous les cas, deux réponses étaient possibles (choix forcé). Sur l'écran, le point disparaissait au moment où la cible intermédiaire était atteinte dans la condition (AP), au moment où la première lettre finissait dans la condition AE et au moment où le point « rebondissait sur une bande » dans la condition AO. Après chaque présentation, le sujet devait prédire la suite du mouvement : pointer vers une « petite » ou une « grande » cible (AP), écrire le digramme « *ll* » ou « *ln* » (AE) ou encore aller « près »

ou « loin » après rebond. Compte tenu des contraintes de projections (miroir) dans la situation d'imagerie la longueur des trajectoires présentées est réduite à 18 *cm* pour les mouvements séquentiels de pointage et le déplacement d'objet. La longueur moyenne des trajectoires des *l* présentés, quant-à-elle, était d'environ 21,2 *cm* (± 2.1 *cm*).

Dans la condition de base (B), utilisée pour mesurer l'activité corticale associée à l'utilisation du dispositif expérimental, un point apparaissait en bas ou en haut de l'écran pendant une durée de 0.9 *s*. Les sujets devaient simplement répondre « haut » ou « bas » pour indiquer la position du point sur l'écran.

Dans chaque condition, les sujets étaient encouragés à répondre rapidement sur la base de leur première impression en sélectionnant le bouton réponse correspondant. Un intervalle de 0.9 *s* s'écoulait entre chaque réponse et le stimuli suivant. Chaque condition (AP, AE, AO, B), comprenant 22 essais (11 exemplaires de chaque mouvement) répartis aléatoirement, était présentée trois fois. L'ordre de succession des 12 situations était défini aléatoirement pour chacun des sujets. Chaque condition durait approximativement 90 *s*. Après avoir participé aux 12 enregistrements du débit sanguin cérébral, une brève explication du but de l'étude était donnée au sujet.

1.4 Imagerie cérébrale

La tomographie par émission de positons repose sur l'estimation du débit sanguin cérébral régional (DSCr). Le radio traceur révélant le DSCr est de l'eau marquée à l'oxygène-15 ($H_2^{15}O$). Le traceur est injecté par voie veineuse, la durée de la demi-vie du traceur est de 123 *s*. L'acquisition du signal commence 10 à 15 secondes après l'injection et dure 70 *s*. La présentation des stimuli commençait 15 secondes avant que le traceur radioactif n'atteigne le cerveau et 10 minutes environ séparaient chaque injection. La caméra tomographe utilisée (Siemens CTI HR+) et la transformation du signal acquis permettent, après reconstruction, une résolution (dimension du voxel) de 2 x 2 x 4 mm (axe x, y et z respectivement). Le logiciel SPM99 est utilisé pour la normalisation des coupes acquises auprès des 8 sujets et le traitement statistique des images reconstruites et normalisées.

2. RESULTATS

Nous présentons d'abord les résultats de l'anticipation perceptive. Il s'agit en effet de vérifier si les sujets sont parvenus à prédire la fin des mouvements présentés. Les résultats de l'analyse du débit sanguin cérébral sont donnés dans une seconde partie.

2.1 Anticipation perceptive : pourcentage de réponses correctes

Les sujets étaient sceptiques quant à leur capacité à discriminer entre les mouvements proposés dans les conditions AP et AE. Toutefois, l'analyse du pourcentage de réponses correctes montre que les prédictions étaient supérieures au niveau du hasard dans les trois conditions ($AP = 77\% \pm 21\%$; $AE = 83\% \pm 14\%$; $AO = 86\% \pm 7\%$). Ces résultats confirment la capacité des sujets à extraire visuellement les caractéristiques des mouvements présentés pour leur associer une réponse correcte qui témoigne du lien établi avec l'action correspondante.

2.2 Imagerie cérébrale

L'analyse des résultats de l'enregistrement du débit sanguin cérébral permet de mettre en évidence l'activité corticale associée avec chaque condition et, par conséquent, d'observer les corrélats neuro-anatomiques du lien établi entre l'action et la perception lors de l'anticipation des mouvements humains. Des contrastes entre les trois conditions où le mouvement était présent (AP, AE, AO) et le niveau de base (B) ont permis d'isoler l'activation résultant de l'anticipation perceptive. Les trois contrastes révèlent l'activation d'aires similaires, en particulier dans le lobe frontal. Puisque nous sommes essentiellement intéressés par les aires activées par l'anticipation dans les conditions AP et AE, un contraste décrivant l'anticipation des mouvements non-humains $AO - B$, a été réalisé pour masquer les contrastes décrivant l'anticipation perceptive dans le cas des mouvements de pointage et d'écriture ($AP - B$ et $AE - B$ respectivement).

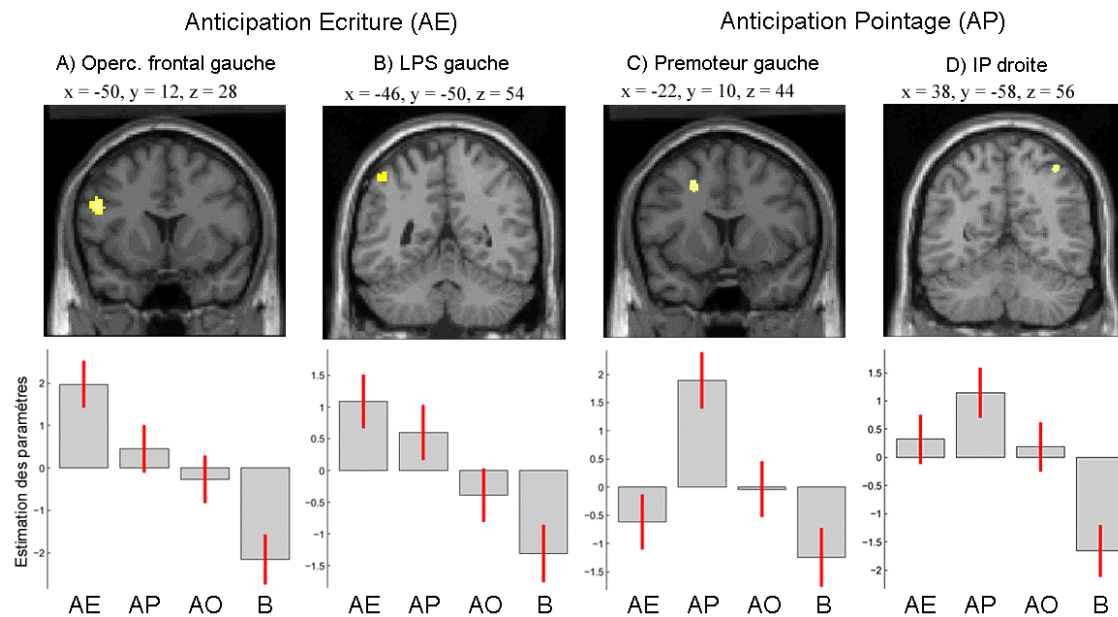


Figure 9. Activité révélée au niveau de l'opercule frontal gauche (A) et du lobule pariétal supérieur (B) dans la condition AE, et au niveau du cortex pré-moteur gauche (C) et de la scissure intra pariétale droite (D) dans la condition AP. La partie supérieure montre la localisation des activations projetées sur une série de coupes coronales d'un cerveau standardisé. Les coordonnées sont aussi disponibles dans la Table 1. La partie inférieure indique l'estimation de l'activation de la zone correspondante dans les différentes conditions présentées. Les conditions AO (non biologique) et B (contrôle).

Les résultats décrivant le débit sanguin cérébral pendant l'anticipation perceptive dans les conditions AP et AE (figure 9 et tableau 1) indiquent une activation commune aux deux conditions dans le cortex frontal inférieur, à gauche, et au niveau du cortex orbito-frontal. Plus spécifiquement, dans la condition AP, le cortex pré-moteur gauche et la scissure intra-pariétale (IP) droite sont activés. Dans la condition AE, une augmentation significative du débit est enregistrée au niveau du lobule pariétal supérieur gauche (LPS), de l'aire de Broca (Opérc. Frontal gauche) et de l'hippocampe gauche.

Tableau 1. Régions où le débit sanguin cérébral est particulièrement important dans les situations AE et AP révélées par les contrastes AE-B et AP-B masqués par le contraste AO-B, $p < 0.005$. Les coordonnées sont relatives à l'espace stéréotaxique MNI.

Region	Anticipation Ecriture (AE)				Anticipation Pointage (AP)			
	Z -score	Coordinates			Z -score	Coordinates		
		x	y	z		x	y	z
Left inferior frontal area	4.85	-42	28	18	3.77	-44	28	18
Left lateral orbitofrontal	4.61	-46	46	-6	4.25	-46	44	-12
Left superior parietal lobule	3.60	-26	-74	46				
Left pars opercularis	4.41	-40	18	20				
Left hippocampus	4.09	-28	-12	-22				
Right intraparietal sulcus					3.82	38	-58	56
Left premotor area					3.79	-22	10	44
Right dorsolateral thalamic nuclei					3.84	8	-12	14
Right posterior orbital gyrus					4.00	40	26	-16

Une nouvelle série de contrastes entre, d'une part, les conditions AP et AE et d'autre part la situation AO révèle les aires activées par la perception des mouvements de pointage et d'écriture indépendamment de l'activité résultant de l'anticipation proprement dite (tableau. 2). Comme pour la comparaison précédente, les résultats indiquent des zones communes d'activation dans les deux conditions AP et AE. En particulier l'activation du lobule pariétal supérieur gauche, la scissure intra pariétale gauche et le gyrus temporal inférieur droit. Notons que les aires communément activées en utilisant ce nouveau contraste sont différentes de celles activées dans la comparaison précédente, à l'exception du lobule pariétal supérieur gauche.

Tableau 2. Régions où le débit sanguin cérébral est particulièrement important dans les situations AE et AP révélées par les contrastes AE-AO et AP-AO.

Region	Stimuli Ecriture				Stimuli Pointage			
	Z -score	Coordinates			Z -score	Coordinates		
		x	y	z		x	y	z
Left superior parietal lobule	6.12	-26	-74	44	3.94	-26	-74	44
Left Intraparietal sulcus	3.76	-28	-62	30	3.99	-30	-62	28
Right inferior temporal gyrus	3.89	68	-50	-12	4.41	66	-48	-12
Left pars opercularis	3.67	-40	22	16				
Left inferior temporal gyrus	4.39	-56	-60	-12				
Left lateral orbital gyrus					4.02	-44	44	-18

Ces résultats suggèrent que la perception visuelle en soi, et la perception visuelle dans le but de prédire, pourraient utiliser des voies différentes qui ne se croisent que partiellement. Cependant, puisque nous n'avons pas dans cette expérience une condition de vision sans anticipation mais que nous déduisons cette situation par l'intermédiaire d'un contraste utilisant la condition AO, cette hypothèse est sujette à caution. La comparaison directe des tables 1 et 2 permet par ailleurs de constater que la perception des mouvements d'écriture active, en plus de l'aire de Broca, le gyrus temporal inférieur gauche. Cette nouvelle comparaison, par contre, ne révèle pas l'activation de l'hippocampe gauche présente précédemment. Les différences d'activation, révélées par les deux contrastes, sont particulièrement importantes dans la condition AP. En effet, seule une activation du gyrus orbital latéral gauche est présente dans la table 2. Aucune des zones révélées par la comparaison précédente ne semble être engagée spécifiquement dans la situation décrite par ce dernier contraste.

3. DISCUSSION

Les performances dans les tâches d'anticipation perceptive pour les mouvements séquentiels d'écriture, de pointage et le déplacement de l'objet indiquent que les sujets sont parvenus à prédire l'identité de la seconde composante sur la base du premier mouvement qui leur était présenté. Le but de cette étude était d'identifier les corrélats neuro-anatomiques de l'anticipation perceptive. L'hypothèse testée était inspirée de la théorie de la simulation motrice. Nous voulions montrer que la capacité d'anticipation perceptive des mouvements de pointage et d'écriture activait des réseaux corticaux distincts impliqués dans la planification de ces mouvements. Le résultat principal concerne les aires corticales activées dans les conditions AP et AE. Dans ces deux conditions, l'anticipation perceptive des mouvements humains engage des circuits pariéto-frontaux considérés comme des structures fondamentales pour le contrôle des actions (Fadiga et al 2000).

L'anticipation des mouvements de pointage active spécifiquement le cortex pré-moteur gauche et la scissure intra-pariétale droite. Ces deux régions sont anatomiquement et fonctionnellement reliées chez le singe et impliquées dans la préparation et le contrôle visuel des mouvements de pointage et de saisie.

L'anticipation perceptive des mouvements d'écriture, en revanche, active l'aire de Broca, le lobule pariétal supérieur gauche et une région hippocampique. La participation de l'aire de Broca dans les fonctions exécutives liées au langage, a été confirmée par des études de neuroimagerie (Binder, Frost, Hammeke, Cox, Rao & Prieto, 1997). Il est notable, toutefois, que l'aire de Broca est habituellement activée lors de la prononciation d'un mot entendu ou écrit mais pas lors de l'écriture d'un mot lu. Cette aire est, sans aucun doute, un centre moteur lié aux schémas articulatoires qui sont implémentés au niveau de la partie ventrale de l'aire motrice primaire (somatotopie de la face, des lèvres, de la mâchoire, de la langue, des doigts de la main, du poignet puis du coude et du bras). Pour l'écriture, il existe un autre circuit comprenant l'aire motrice supplémentaire et la partie postérieure du gyrus frontal moyen (une subdivision du cortex pré-moteur), en liaison avec la partie intermédiaire et dorsale de l'aire motrice primaire (somatotopie des doigts, de la main, du poignet puis du coude et du bras). Ces aires motrices seraient sous l'influence indirecte de l'aire de Wernicke qui projette sur la zone du pli courbe et du gyrus supra-marginalis (ces deux dernières zones étant en relation avec l'aire visuelle primaire). Ce réseau spécifique de l'écriture serait plus susceptible d'être activé par notre tâche d'anticipation perceptive que ceux impliquant l'aire de Broca qui sont associés à la vocalisation.

Nous pensons que l'activation de l'aire de Broca reflète une vocalisation mentale des digrammes. Parmi les territoires impliqués dans cette situation d'anticipation perceptive des mouvements d'écriture, l'activation de l'hippocampe, considéré comme une zone de mémoire, reste inexploquée. L'activation du lobule pariétal supérieur constitue également un résultat contestable dans cette étude. L'écriture implique habituellement des aires pariétales inférieures. Les résultats d'une étude clinique récente fournissent des arguments en ce sens (Chary, Méary, Orliaguet, David, Moreau & Kandel, en révision). Les auteurs mesurent les capacités d'anticipation perceptive et motrice pour des mouvements séquentiels de pointage et d'écriture chez une patiente dysgraphique (D.C., 71 ans). L'examen IRMf de la patiente D.C. révèle une lésion de l'hémisphère gauche, incluant le gyrus pariétal inférieur, le gyrus angulaire et le gyrus supra-marginal. Ce tableau confirme les remarques anatomiques concernant l'origine pariétale inférieure du réseau impliqué dans l'écriture. L'examen neuropsychologique indique un quotient verbal normal excluant la possibilité d'aphasie. L'écriture de la

patiente est lente, hésitante, marquée par des blocages et des inversions de séquences. L'analyse de la production motrice dans des situations de pointage séquentiel et d'écriture de digrammes — identiques à celles présentées dans cette expérience — montre que les indices cinématiques caractéristiques de l'anticipation motrices sont présents dans les mouvements de pointage mais pas pour les mouvements d'écriture. L'étude des capacités d'anticipation perceptive de la patiente D.C. révèle, également, une dissociation entre les conditions « pointage » et « écriture ». Pour les mouvements de pointage, les performances sont normales, la patiente D.C. est capable de prédire l'identité de la seconde composante. En revanche, cette patiente ne montre aucune capacité d'anticipation perceptive dans le cas des mouvements d'écriture. Les performances sont dans ce dernier cas au niveau du hasard.

Pour résumer, les résultats de l'étude d'imagerie indiquent que l'anticipation perceptive des mouvements de pointage active des aires corticales spécifiques, connues pour être impliquées dans la planification des mouvements de pointage. Dans la condition d'anticipation perceptive des mouvements d'écriture, les résultats sont plus ambigus. Toutefois, les résultats de l'étude d'un cas de dysgraphie permettent d'affirmer que notre capacité à anticiper les mouvements humains dépend de l'intégrité des circuits impliqués dans la production des mouvements correspondants. Il est donc possible d'interpréter l'anticipation perceptive comme étant le résultat d'un processus de simulation motrice intériorisée.

Dans cette expérience, et en prenant en compte les résultats obtenus par Chary et collaborateurs (en révision), l'existence de liaisons fonctionnelles entre la perception et l'action, supposée sur la base des évidences comportementales (la capacité de prédire), semble confirmée sur un plan neuroanatomique. Cependant, dire que l'anticipation perceptive implique une simulation motrice et que cette simulation permet finalement aux sujets de prédire reste vague. Qu'elle est exactement le rôle de la simulation dans la prédiction ? Les sujets répètent-ils mentalement le mouvement et effectuent-ils un choix par comparaison ou sont-ils simplement sub-consciemment influencés par la cinématique présentée de telle sorte que l'émission de la bonne réponse soit simplement plus probable ? La simulation est-elle implicite ou explicite ? En fait, dans le cas de l'anticipation perceptive, il persiste toujours une ambiguïté concernant le niveau auquel la motricité contribue à la prédiction. La motricité est-elle l'instrument de la volonté du

sujet, qui simulerait les différents cas de figures (digrammes ou pointage) pour évaluer la probabilité que le stimulus appartienne à l'une ou l'autre des catégories, ou est-elle automatiquement activée, la simulation restant à un niveau sub-conscient ? L'activation orbito-frontale qui apparaît dans les deux conditions principales d'imagerie, AP et AE, est traditionnellement associée à l'attente de récompenses, en particulier lorsque la réponse est ambiguë (Tremblay & Schultz, 1999), et au processus de prise de décision (Elliott, Dolan & Frith, 2000). Ces observations sont compatibles avec l'hypothèse d'une simulation prenant place au plan conscient. Le sujet simulerait les digrammes et les pointages et déciderait en fonction de la correspondance des séquences simulées avec le modèle proposé. Toutefois, si l'on admet ce schéma, l'anticipation perceptive doit être comprise comme une tâche de discrimination entre mouvements imaginés et mouvements présentés. Quoi qu'il en soit, il faut reconnaître que les stratégies cognitives employées par les sujets engagés dans les tâches d'anticipation perceptives restent indéfinies (Orliaguet et al, 1997 ; Louis-Dam et al, 2000 ; Kandel et al, 2000).

En fait, à l'issue de cette expérience nous avons pu distinguer des circuits spécifiquement impliqués dans des situations d'anticipation mais l'essence même du phénomène d'anticipation nous échappe encore. L'anticipation se situe au niveau de ces réseaux spécifiques que nous avons isolés. Saisir l'anticipation perceptive ce serait comprendre ce qui se passe dans les réseaux, c'est-à-dire, l'anticipation motrice. Dans les travaux qui vont suivre nous allons abandonner cette situation d'anticipation perceptive que nous jugeons trop ambiguë, pour proposer une situation de test de la préférence perceptive. Nous pensons que cette situation permet d'étudier le rôle que jouerait l'activation de réseaux moteurs dans une tâche de perception en contrôlant l'effet d'une simulation consciente du mouvement sur la décision du sujet.

VII. ANALYSE DE LA PREFERENCE PERCEPTIVE POUR LA VITESSE

Nous avons rappelé, dans l'introduction de la partie expérimentale, que les sujets avaient une tendance à préférer, en perception, les stimuli compatibles avec les règles de production motrice. Ces similarités pourraient être attribuables à une tendance spontanée du CNS à simuler des actions dans des situations expérimentales de perception. La revue de questions théoriques nous a permis de dessiner les contours d'une notion un peu particulière : « la préférence perceptive » pour désigner ces correspondances entre l'expérience qui est faite d'un stimulus et la motricité. Nous pensons que l'activation de zones motrices lors de l'observation d'actions pourrait effectivement avoir pour corollaire l'émergence de principes moteurs en perception. Les résultats de l'étude de neuroimagerie, que nous venons de présenter, ont été interprétés en ce sens. L'objectif est maintenant de progresser dans la compréhension du rôle de la simulation pour la perception. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs expériences destinées à tester la propension des sujets à choisir une vitesse de référence pour un mouvement biologique.

La méthode utilisée dans la prochaine expérience, et la plupart de celles qui vont suivre, consiste toujours à demander à un sujet d'ajuster la vitesse d'un point se déplaçant sur un écran. Dans cette 1^{ère} expérience le point parcourt une trajectoire elliptique ($l = 29.73 \text{ cm}$). Des détails supplémentaires sur le stimulus sont donnés dans la partie matériel et méthode et dans la figure 10. Peut-on prédire les vitesses moyennes ajustée par des sujets dans cette situation ? Ou bien, et de manière équivalente, peut-on prédire la tendance centrale des périodes finales (P_f) choisies par les sujets pour un cycle de cette ellipse ?

Quelles prédictions pourraient être formulées si la préférence perceptive était basée sur une simulation motrice intériorisée ? En conformité avec les résultats obtenus dans d'autres expériences nous pouvons faire l'hypothèse que la moyenne des P_f devrait correspondre à la période moyenne mesurée lors de la production d'ellipses comparables. En effet, les travaux sur le mouvement imaginé sont quasiment unanimes sur ce point : les durées des mouvements simulés et exécutés concordent²⁴ (Decety et al,

²⁴ A l'exception de la situation décrite dans la section IV.2.2, dans laquelle on demande à des sujets de simuler un mouvement de locomotion tout en portant un sac de 25 kg (Decety et al, 1989).

1989 ; Decety & Michel, 1989 ; Decety & Jeannerod, 1996). Pour des adultes, ce temps de mouvement pourrait être estimé à 1,2 secondes dans le cas d'un « rythme libre mais constant » (voir Viviani & Schneider, 1991, figure 4, p 206). Cette estimation reste cependant discutable pour deux raisons principales. D'abord parce que l'expérience citée comporte un nombre réduit de sujets adultes ($n = 6$). Ensuite, parce qu'une importante variabilité inter-individuelle des tempos moteurs est systématiquement observée (Fraisse, 1974 ; Viviani & Schneider, 1991). En fait, il faut bien saisir qu'un tracé d'ellipse peut être réalisé à des vitesses différentes. Un dessin très rapide, accompagné d'une forte variabilité spatiale, peut atteindre plus de 100 *cm/s*. A l'opposé, le lent recopiage de la forme est réalisé à une vitesse de quelques *cm* par secondes. Il est toutefois possible de définir des limites de vitesses acceptables d'un point de vue moteur en prenant respectivement comme critères, l'absence de la forme requise et la décomposition du mouvement en sous unités. Dans ce cas, n'importe quelles périodes entre 0.3 *s* et plusieurs secondes pourraient être choisies selon les caractéristiques, intrinsèquement fixées, du mouvement simulé par le sujet.

Les travaux sur la perception et la production des séquences rythmiques permettent de faire des prédictions alternatives concernant la moyenne des P_f qui pourraient être choisies. Par exemple, un pic d'observations entre 100 et 120 *bpm* (périodes de 0.5 - 0.6 *s*) pourrait être attendu sur la base des travaux de Fraisse (1974). En se basant sur des études de musicologie (Moelants, 2002) une zone entre 81 et 162 *bpm* (0.37 - 0.74 *s*) pourrait contenir jusqu'à 70 % des tempos préférés observés. Mais ces prédictions sont, elles aussi, discutables. En fait, elles sont valables à condition que les sujets assimilent une révolution entière de l'ellipse à 1 temps de leur tempo préféré. Il n'est pas exclu que l'ellipse puisse être assimilée à 2 voire 4 temps. Dans ces cas, les prédictions précédentes peuvent être divisées par deux ou quatre. Les sujets se centreraient alors autour de périodes de 1 à 1.2 *s* ou encore de 2 à 2,4 *s*. Dans le domaine de la production d'ellipses, des hypothèses de segmentation de ce type ont été discutées (Wann, Nimmo-Smith & Wing, 1988 ; Viviani & Schneider, 1991)

Une des difficultés associée à l'hypothèse d'un choix reflétant un tempo fondamental est que celui-ci n'est pas assimilable au temps de mouvement. Le temps de mouvement est fortement contraint par la forme et la longueur de la trajectoire ce qui ne serait pas le cas d'un tempo fondamental, indépendant de l'exécution et déterminé par des horloges internes. Quoi qu'il en soit, ces dernières prédictions n'excluent pas

l'hypothèse d'une simulation motrice. Le mouvement, simulé ou exécuté, et le tempo (qui est une mesure de vitesse) sont en étroite relation.

Finalement, les sujets pourraient aussi être tentés de choisir des vitesses qui sont au-delà des capacités du système moteur (par exemple : 600 cm/s , c'est-à-dire 0.05 s par cycle). Après tout, pourquoi ne pas préférer une vitesse qui transforme l'harmonieux mouvement apparent du stimulus en un ensemble original de points lumineux clignotants (voir section *modulation de la période et percepts*), accompagnés ou non, d'un phénomène d'oscillation perceptive portant sur le sens de la rotation ? Finalement, cette première expérience s'organise autour d'une question. Quelle forme pourrait prendre une préférence perceptive pour les vitesses ?

1. METHODE

La méthode utilisée dans cette expérience consiste à demander aux sujets d'ajuster la vitesse d'un point se déplaçant sur un écran.

1.1 Sujets

Cent quatorze étudiants des universités de Grenoble ont accepté de participer à une expérience portant sur la « perception visuelle ». Le recrutement avait lieu dans les halls d'entrées des bibliothèques universitaires. Lorsque des précisions étaient demandées par les personnes interrogées, il était ajouté que ce qu'ils devaient faire était « expliqué sur l'écran » et que l'expérience n'était « pas très longue ». Les passations avaient lieu sur place, dans un endroit à l'écart du passage. Le pourcentage de sujets féminins dans l'échantillon est de 58 %, le pourcentage de gauchers est de 13 % et l'âge moyen est de 25 ± 4 ans. Tous les sujets avaient une vue normale ou corrigée vers la normale.

1.2 Stimulus

Le choix du stimulus est guidé par 3 contraintes : 1) le mouvement doit être biologique, 2) le mouvement doit avoir lieu dans un plan, au sens géométrique du terme, 3) il doit être périodique, pour laisser le temps au sujet d'ajuster la vitesse. Les points 1 et 2 permettent respectivement d'éviter que la forme perçue du stimulus soit sujette à de fortes distorsions (Viviani & Stucchi, 1989), et d'éviter les difficultés inhérentes à la reproduction, sur l'écran, d'une trajectoire dans un espace 3D. Au moins deux types de mouvements simples répondent à ces contraintes. Les mouvements d'aller et retour avec un stylo entre deux points et le tracé continu d'ellipses. Ces deux types de mouvements ne sont pas assimilables. Le premier est généralement composé de deux séquences discrètes (sauf si la variabilité spatiale tolérée est grande) alors que le second peut être assimilé à une seule unité d'action, en dépit des remarques sur la décomposition possible du mouvement en quart de cycles (Wann, Nimmo-Smith & Wing, 1988 ; Viviani & Schneider, 1991). Dans cette première expérience, nous allons employer une ellipse du type de celles utilisées par Viviani et Stucchi, (1992a).

Préparation du stimulus. L'ellipse est définie par les équations $x = a \cos \theta$ et $y = b \sin \theta$, où θ représente π varié linéairement de $-\pi$ à π (400 valeurs). Les constantes a et b correspondent respectivement aux semi-axes de l'ellipse ($a = 6.38 \text{ cm}$; $b = 2.71 \text{ cm}$). Le semi-axe ratio b/a est de 0.425. L'excentricité (Σ) correspondante est de 0.9. Les coordonnées x et y calculées ont ensuite subies une rotation de 45° (Figure 10, A). Le périmètre approché de l'ellipse présentée est de 29.73 cm . La cinématique (Figure 10, B) de cette ellipse constitue un cas idéal de mouvement biologique (Viviani et Stucchi, 1992). La relation du rayon de courbure R et de la vitesse tangentielle V_t est parfaitement résumée par la fonction de puissance $V_t = K.R^{1/3}$. Le gain de vitesse K dépend de la période d'implémentation (P en secondes) de la série de 400 paires de coordonnées x, y . La relation entre K et P se résume par la fonction, empiriquement définie pour ce cas : $K = 16.321.P^{-1}$. La période P est précisément la quantité manipulée par les participants.

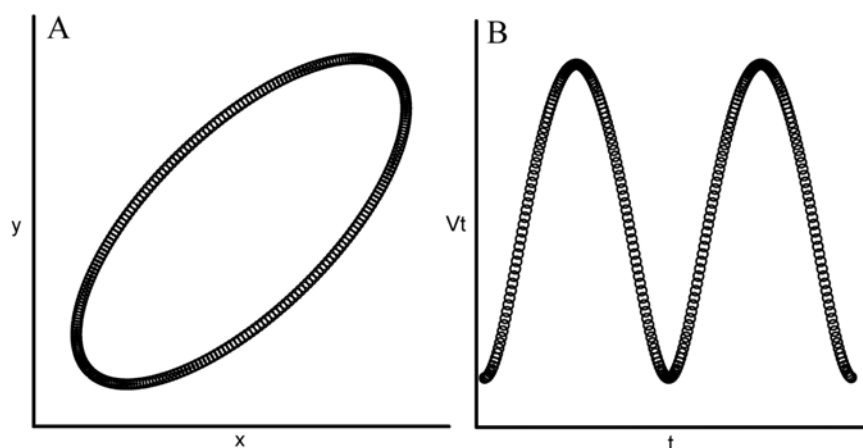


Figure 10. A) Forme, et B) profil de vitesse tangentielle du stimulus. L'excentricité Σ de l'ellipse est de 0.9. Lors de sa présentation sur l'écran l'ellipse a une longueur approchée de 29.73 cm. Le profil de vitesse tangentielle présente la modulation caractéristique des mouvements humains. La vitesse tangentielle (V_t) dépend du rayon de courbure (voir texte) et de la période (P) d'implémentation de la série de 400 paires de coordonnées x, y .

Présentation du stimulus. Le déplacement du point est défini paramétriquement par 400 paires de coordonnées x, y . Le stimulus (la série de positions) était implémenté sur un écran d'ordinateur (17"). Les dimensions du fond blanc sur lequel le point était présenté étaient 22 x 22 cm. La trajectoire n'était jamais pleinement visible mais le déplacement du point ($\varnothing = 0.5$ cm), dans le sens des aiguille d'une montre, était suivi d'une légère traînée (pour certaines vitesses, voir partie résultats). La carte graphique autorisait une résolution de 1024 x 768 pixels avec une fréquence de rafraîchissement de l'image de 85 Hz. A une distance de 50 cm, l'ellipse s'inscrit dans un carré couvrant 15*15 degrés d'angle visuel. Le logiciel utilisé pour la présentation des stimuli permettait de manipuler indépendamment la longueur de la trajectoire (l) et la période de révolution (P). Dans cette expérience la longueur restait constante ($l = 29.73$ cm).

La période (P) était définie par rapport au nombre de paires x, y composant la trajectoire. Le logiciel permettait de manipuler en ligne, la durée d'affichage du point aux positions calculées. Cette durée, multipliée par le nombre de paires ($n = 400$), donne P. Le changement de position du point le long de la trajectoire s'accompagne d'un phénomène de mouvement apparent et l'impression générale laissée par le stimulus est celle du déplacement d'un point. La durée d'affichage du point étant constante pour l'ensemble des paires, la modulation caractéristique du profil de vitesse (Figure 1 B) est préservée quel que soit P. La limite inférieure de P était de 0.05 s. Les

sujets pouvaient moduler la période totale P par pas de 0.025 s en utilisant les flèches droite et gauche d'un clavier. Lors de l'apparition du point sur l'écran la période initiale (P_i) était fixée aléatoirement pour chaque essai (équipartition entre 0.1 s et 5.1 s). Dans cette expérience, la période finale (P_f) ajustée par le sujet constitue la variable dépendante analysée.

1.3 Procédure

Les sujets étaient assis face à l'écran à une distance de 50 à 60 cm . Le clavier était disposé de telle façon que le sujet puisse manipuler les flèches droite et gauche ainsi que la touche entrée avec sa main préférée. La Figure 11 donne une vue schématique de la situation.

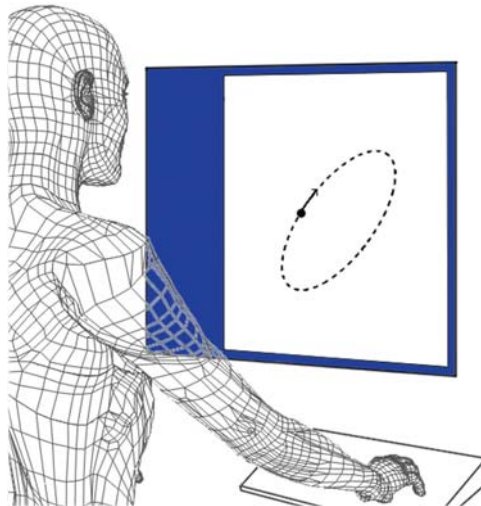


Figure 11. Vue schématique de la situation expérimentale. Le sujet est assis face à l'écran et ajuste la période, c'est-à-dire la durée d'un cycle, grâce aux flèches droite et gauche du clavier. Cette manipulation de la période augmente ou diminue la vitesse moyenne perçue du point. Le jugement du sujet porte sur la vitesse. Il doit ajuster la vitesse qu'il « préfère ». Le participant valide son choix en appuyant sur la touche « Entrée ». La période finale (P_f) est la variable dépendante dans ce plan d'expérience.

La tâche consistait à ajuster la vitesse moyenne du mouvement figuré par le point. La consigne, présentée sur l'écran, précisait : « Lorsque l'expérimentateur mettra en route l'expérience, vous allez voir un point décrire une ellipse avec une vitesse donnée. Avec la flèche droite du clavier vous pourrez ralentir ce point et avec la flèche gauche vous pourrez, au contraire, accélérer ce point. A l'aide de ces deux flèches vous devrez ajuster la vitesse du point. Ajustez la vitesse comme vous préférez. Lorsque vous serez satisfait, appuyez sur la touche Entrée. Après une courte pause, le point

réapparaîtra : il y aura 8 essais en tout ». On indiquait également aux sujets : « si vous appuyez en continu sur les touches vous diminuerez ou vous augmenterez beaucoup la vitesse ». Le mouvement se répétait sans discontinuité jusqu'à ce que les sujets valident la période finale (P_f) correspondant à leur vitesse préférée. Après une pause de durée variable (de 1 à 2.5 s, tirage aléatoire) le point apparaissait de nouveau sur l'écran avec une nouvelle période P_i et le sujet devait reprendre la procédure d'ajustement. A l'issue des 8 essais, le sexe, l'âge et la latéralité (main couramment utilisée pour écrire) du sujet étaient reportés dans un fichier avec ses résultats. Nous avons également demandé à la plupart des sujets, 1) ce que pouvait représenter le mouvement et 2) s'il avait fixé un point particulier de l'écran où s'il avait suivi le point des yeux. Une brève explication du but de l'expérience était finalement donnée. L'expérience pouvait durer entre 7 et 15 minutes selon les sujets.

2. RESULTATS

Les données comprennent, pour chaque sujets, 8 paires de valeurs P_i et P_f représentant, respectivement, les périodes initiales et finales du stimulus. L'analyse de ces données est faite en plusieurs étapes. Avant l'analyse proprement dite, dans laquelle nous estimons les périodes moyennes préférées par les sujets ainsi que la variabilité inter et intra-individuelle mesurée, un court paragraphe est consacré à une description des différents percepts associés à la modulation de la période et 3 sections sont consacrées à une analyse préliminaire des données. Les résultats principaux concernent évidemment les périodes finales choisies par les sujets, mais nous allons voir au préalable que l'analyse détaillée de la relation entre P_i et P_f livre également des résultats intéressants.

2.1 Modulation de la période et percepts

Pour l'essentiel des valeurs possibles de la période P , le stimulus est perçu comme le mouvement uniforme d'un point. Cependant, pour les plus grandes valeurs de P , le mouvement perçu devient discontinu, les différentes positions prises par le point sont identifiées. Lorsque P est > 50 s, la durée d'affichage du point à chaque position x , y est > 0.125 s. Ce délai est suffisant pour saisir qu'il s'agit de deux positions séquentiellement présentées. En revanche, pour d'autres valeurs de la période (0.05 s $<$

$P < 0.3 s$) le stimulus perçu se résume à un ensemble de points clignotants. La forme du stimulus apparaît alors clairement et un mouvement de cet ensemble de points peut être perçu, accompagné ou non d'un phénomène d'oscillation perceptive portant sur le sens de la rotation. Il est notable, compte tenu du stimulus, du matériel et des caractéristiques du système visuel, que la perception du déplacement uniforme d'un seul point en mouvement n'est possible que pour des périodes $> 0.7 s$ et $< 50 s$. Entre $0.3 s$ et $0.7 s$ plus d'un point est généralement perçu, et le déplacement du point est suivi d'une trace résiduelle de longueur variable.

2.2 Représentation graphique des résultats individuels

Les résultats de l'expérience peuvent être représentés graphiquement pour chaque participant. La figure 12 présente les P_i et P_f , en secondes, des 12 premiers sujets. Hormis les différences de tendance centrale et de variabilité qui seront détaillées ultérieurement l'observation de la figure 12 révèle deux phénomènes que nous nommerons respectivement « capture » et « attraction ».

La capture correspond au cas où le participant ne module pas la période initiale du stimulus. Les valeurs de P_i et P_f peuvent ainsi être confondues (figure 12, sujets 2, 4, 6, 8, 9 et 12). En d'autres termes, le sujet accepte la solution P_i comme reflétant sa préférence finale. Le phénomène d'attraction pourrait, lui, se définir comme une co-variation de P_f et P_i . La période initiale pourrait déterminer, en partie, l'oscillation de la valeur de P_f autour de sa tendance centrale (voir figure 12).

L'estimation des indices de tendance centrale et de dispersion doit-elle être réalisée sans se soucier de ces deux phénomènes ? Rien n'est moins sûr. Pour s'en assurer, nous avons analysé la distribution totale des observations et filtré les données atypique. Ensuite, nous avons analysé les phénomènes de capture et d'attraction. Finalement, nous calculerons pour chaque sujet les indices de tendance centrale et de dispersion reflétant leurs préférences perceptives, et nous analyserons la répartition de ces indices.

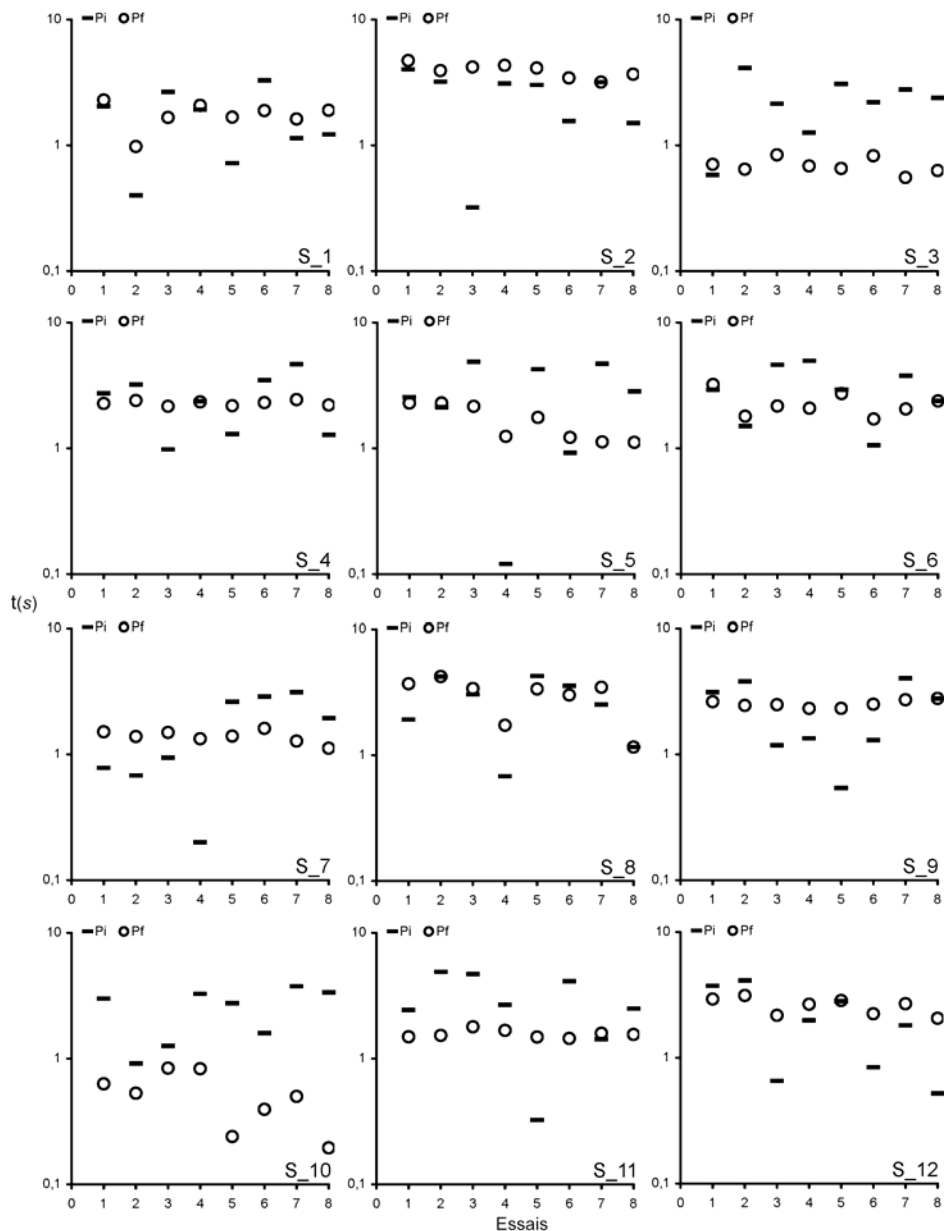


Figure 12. Description des résultats individuels. Les données sont brutes. Les résultats des 12 premiers sujets sont présentés dans l'ordre, de haut en bas et de gauche à droite. L'axe des abscisses représente le nombre d'essai et l'axe des ordonnées le temps (axe log, en secondes). Les périodes initiales (tirage aléatoire entre 0.1 et 5.1 s) et les périodes finales choisies sont respectivement représentées par des traits et des cercles. Les P_f peuvent changer considérablement d'un participant à un autre. De même, la dispersion des 8 P_f semble être plus ou moins importante selon les sujets (voir l'analyse de la tendance centrale et de la variabilité). Les sujets 2, 3, 4, 7, 9 et 11 semblent avoir une idée assez précise de la vitesse qu'ils préfèrent. Ce qui n'est pas le cas des sujets 1, 5, 6, 8 et 10. Remarquez que les valeurs de P_i et P_f peuvent parfois être confondues (2, 4, 6, 8, 9 et 12). Cette observation est valable pour 6 des 12 sujets présentés. Ce phénomène sera assimilé à une capture de la préférence (P_f) par la valeur P_i (voir résultats). Plus généralement, il semble que P_f et P_i ne sont pas indépendants. Une covariance de P_i et P_f pourrait être observée chez les sujets 1 et 4 par exemple. La préférence perceptive pourrait ainsi révéler un phénomène d'attraction, une influence de P_i sur P_f (voir résultats).

2.3 Analyse de la distribution des observations et filtrage des données atypiques

A ce stade, il s'agit simplement de décrire la distribution des valeurs de P_f . Pour se faire, les 912 valeurs observées sont réunies dans la figure 13. Les minimums et maximums observés sont de 0.05 s et 43.25 s. La médiane de la distribution est à 2.125 s, la moyenne arithmétique est de 2.45 s ($\sigma = 2.14$ s). Les limites du 1^{er} et 3^{ème} quartile sont 1.375 s et 3.10 s. L'asymétrie et l'aplatissement de cette distribution indiquent que les valeurs de P_f ne se répartissent pas normalement. Le centre de la distribution est décalé vers les valeurs les plus hautes par rapport à une distribution normale (coefficient d'asymétrie = 2.29). La différence positive observée entre moyenne et médiane indiquait déjà cette tendance : la moyenne est sensible aux valeurs élevées de P_f . La distribution est également beaucoup moins aplatie que le modèle normal (Kurtosis = 154,13).

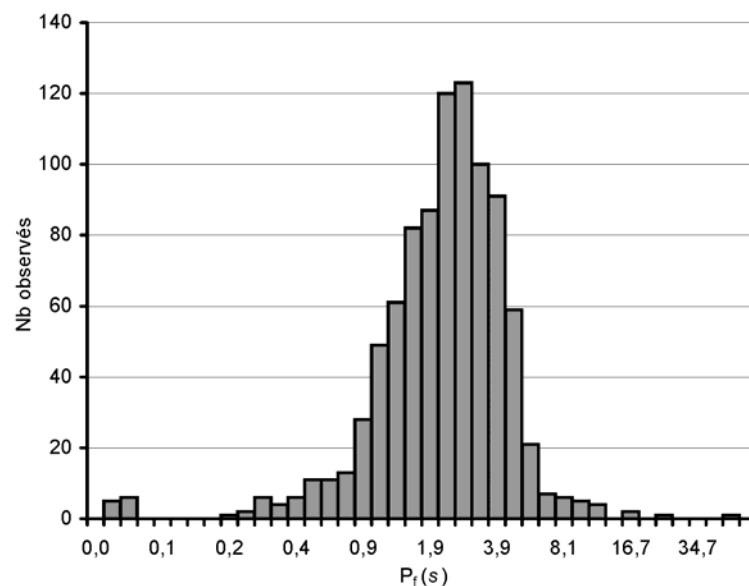


Figure 13. Répartition des 912 P_f « préférées ». Le nombre de classes est de 40. L'origine sur l'axe x est fixée à 0.04 s. L'échelle est multiplicative, le facteur est de 1.2. Pour les valeurs de P_f , le minimum et le maximum observés sont respectivement de 0.05 s et 43.25 s. Les limites du 1^{er} et 3^{ème} quartile sont 1.375 et de 3.10 secondes. La médiane est à 2.125 s, la moyenne arithmétique est de 2.45 s ($\sigma = 2.14$ s). Cette différence entre la médiane et la moyenne reflète une asymétrie de la distribution (voir texte). Cette caractéristique est masquée par l'échelle multiplicative.

Il est rassurant de constater que la méthode utilisée autorise les sujets à choisir des valeurs très différentes. Les sujets se sont sentis libres d'exprimer des préférences particulières pour des stimuli relativement rapides ou lents. Cependant, la présence de valeurs extrêmes et la forme atypique de la distribution affaiblissent la validité des indices de forme, construits sur la distribution normale. La première opération effectuée sur les données consiste donc à exclure 2.5 % des observations extrêmes, situées de part et d'autre de la distribution. Sur la figure 13, 95 % des valeurs de P_f sont comprises entre 0.325 s et 6.075 s.

Après filtrage, le nombre d'observation est de 867, la médiane de la distribution est à 2.14 s, la moyenne arithmétique est de 2.27 s ($\sigma = 1.09$ s). Le centre de la distribution est toujours décalé vers les valeurs les plus hautes (coefficient d'asymétrie = 0.58). La distribution est maintenant plus aplatie qu'une distribution normale (Kurtosis = -0.22). En fait, la meilleure description des données est obtenue en utilisant une fonction Eulérienne de première espèce (fonction *Gamma*). La distribution Gamma est définie par $f(x) = (x/b)^{c-1} * e^{-(x/b)} * [1/b \Gamma(c)]$ avec $0 \leq x$, $b > 0$, $c > 0$, où Γ est la fonction Gamma, e est la base du logarithme népérien (2.7182), et où b et c représentent les paramètres d'échelle et de forme (dans notre cas, 0.57 et 3.94 respectivement). Une table détaillée des répartitions observées et théoriques (Gamma) est donnée en annexe 1. La comparaison des fréquences observées et théoriques donne : $\chi^2 = 30,53$; $dl_{(ajustés)} = 24$; $p = ,16$.

Nous avons vu que parmi les valeurs de P_f choisies par les sujets, certaines se confondent avec la valeur P_i . Comment se répartissent ces valeurs et existe-t-il une influence plus discrète de P_i sur P_f ?

2.4 Capture et attraction

La capture correspond au cas où le participant ne module pas la période initiale du stimulus. Dans ce cas, les valeurs de P_i et P_f sont confondues (figure 12, sujets 2, 4, 6, 8, 9 et 12). En d'autres termes, le sujet accepte la solution P_i comme reflétant sa préférence finale. Le phénomène d'attraction pourrait, lui, se définir comme une co-variation de P_f et P_i . La période initiale pourrait donc déterminer, en partie, l'oscillation de la valeur de P_f autour de sa tendance centrale (voir figure 12). Nous allons d'abord analyser les captures avant de tenter une description de l'attraction.

Capture. Nous venons de dire que la capture correspond au cas où le participant ne module pas la période initiale du stimulus. Ceci peut s'entendre du point de vue physique, mais aussi d'un point de vue psychophysique. L'absence de modulation de P_i pourrait ainsi correspondre à une absence réelle de modification de la vitesse, mais aussi, à une modulation de cette vitesse ne dépassant pas les limites de discrimination. Par souci d'économie et de simplicité, la première conception est explicitement adoptée depuis la section description des résultats individuels (figure 12). C'est le deuxième point de vue, plus général, qui est retenu maintenant. La capture est donc redéfinie comme le cas pour lequel la modulation de la vitesse moyenne du stimulus, donnée par $|1/P_i - 1/P_f|$, reste inférieure au seuil de discrimination pour les vitesses. Nous avons vu que ce seuil varie entre 5 et 8 % selon les études. Dans notre cas il a été fixé à 5%. Le nombre de captures recensées en utilisant ce critère est de 97. Ce nombre représente 11.18 % des observations restantes après filtrage des données atypiques.

Comment se répartissent ces captures de P_f par P_i dans la population et qu'elles sont les conditions favorables à leurs apparitions ? Pour répondre à la première question, la répartition de la population en fonction du nombre de captures est présentée (figure 14 A). En fait ce phénomène concerne 50 % des participants. Pour ces derniers, la valeur de P_i a été, au moins une fois, considérée comme représentant leur vitesse préférée. Le nombre de capture par essai varie de 9 à 14 pour les 7 premiers essais. Une augmentation est observée au 8^{ème} essai ($n = 18$). Cette augmentation peut être attribuée à l'effet de facteurs généraux de type motivationnel et attentionnel. Sur le dernier essai, les sujets sont plus enclins à répondre sans vraiment chercher à indiquer leur préférence.

La valeur de P_i est échantillonnée entre 0.1 et 5.1 s. Compte tenu de la répartition des P_f , il existe une probabilité non nulle pour que P_i soit effectivement proche de la période préférée d'un participant. En fait, dans ce cas précis, il ne s'agirait pas à proprement parler d'une capture de P_f par P_i mais plus simplement d'une conjonction de P_f et P_i . En revanche, si P_i est effectivement différent de la période préférée des sujets alors, nous pourrions parler de capture.

Pour exprimer l'écart entre la tendance centrale du sujet (sa référence) et la valeur P_f capturée nous avons calculé la moyenne des valeurs de P_f choisies par sujet (hors extrêmes). Les valeurs de P_f et leurs moyennes ont ensuite été exprimées comme des vitesses. Finalement, les différences de vitesses entre les valeurs capturées et leurs

moyennes ont été exprimées comme des fractions de ces moyennes. Les valeurs obtenues traduisent l'éloignement (en pourcentage de la vitesse moyenne préférée) des valeurs de P_f capturées relativement à la tendance centrale des sujets pris individuellement. Le seuil de discrimination pour les vitesses est de 5 à 8 % selon les études. Ici, bien sûr, il ne s'agit pas de discriminer mais d'indiquer la vitesse préférée. Cette référence psychophysique peut cependant servir à délimiter une zone pour laquelle, les captures peuvent être assimilées à de simples conjonctions (nous choisissons ± 10 % pour cette étude). Hors de cette zone d'indifférence perceptive nous devons admettre que le participant choisit, pour une raison qui reste à déterminer, une vitesse différente de la référence qu'il semble s'être fixé.

La répartition de 93 des 97 valeurs calculées est présentée dans la figure 14 B. Quatre valeurs (≥ 100 %) ont été écartées et les 8 essais ont été mélangés. La distribution est décalée vers les valeurs positives (coefficient d'asymétrie = 1.46). La moyenne est de $-2,5$ % ($\sigma = 20$ %), la médiane est à -4 %. Les limites du 1^{er} et 3^{ème} quartile sont respectivement à -12 % et $4,4$ %. Les minimums et maximums observés sont de -50 % et 99 %. La zone inférieure à -10 % comprend 32 % des captures (18 % au-delà de 10 %).

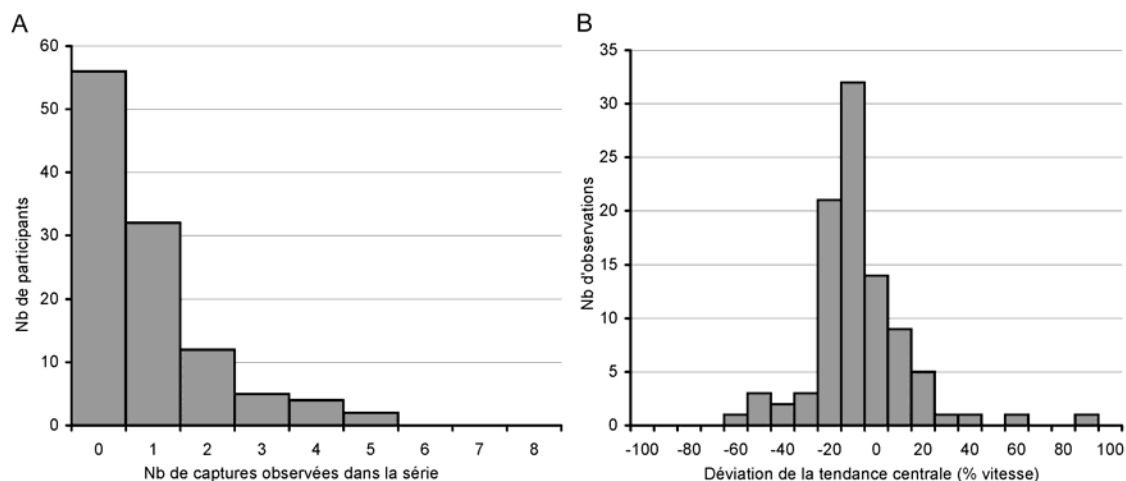


Figure 14. A) Répartition de la population en fonction du nombre de captures. 50% de la population ne cède pas à la tentation d'accepter la solution P_i comme représentant sa préférence. Pour certains sujets cependant ($n = 6$), le nombre de captures représente plus de 50 % du nombre de valeurs P_f mesurées. B) Les captures se produisent même lorsque la valeur P_i présentée correspond à une vitesse éloignée de la tendance centrale du sujet. En fait, 49 % des captures observées correspondent à des variations de ± 10 % de la vitesse moyenne préférée. La médiane de cette distribution est égale à $-4,4$ %, la moyenne est de $-2,5$ % ($\sigma = 20$ %).

Les captures apparaissent même lorsque la valeur P_i qui est présentée s'écarte, en terme de vitesse, de plus de 10 % de la période préférée des participants. Les captures reflètent donc à la fois le fait que le sujet reconnaît et accepte les valeurs de P_i proches de sa préférence, et le fait qu'il s'écarte parfois clairement de cette préférence.

Attraction. Pour vérifier la présence ou l'absence d'une attraction de P_f par P_i , nous avons éliminés de la population les 97 valeurs de P_f correspondants aux captures. L'analyse porte maintenant sur 84 % des données brutes. Nous voulions vérifier si P_f pouvait être en partie expliquée par P_i . Dans le cas de la capture, P_i explique totalement P_f . Nous sommes maintenant à la recherche d'une influence plus discrète.

Pour avoir plus de précisions, nous avons calculés la corrélation des valeurs filtrées de P_f de P_i (figure 15 A). Les résultats donnent $P_f = 0.152.P_i + 1.817$; $r = 0.20$; $F_{(1,766)} = 34,231$; $p < ,01$. La corrélation est faible, mais significative. La période initiale P_i expliquerait jusqu'à 4,2 % (r^2 ajusté) de la valeur de P_f . Cet effet est nettement visible lorsque les P_f sont moyennées, en fonction des P_i , par clusters de 0.5 s (figure 15 B).

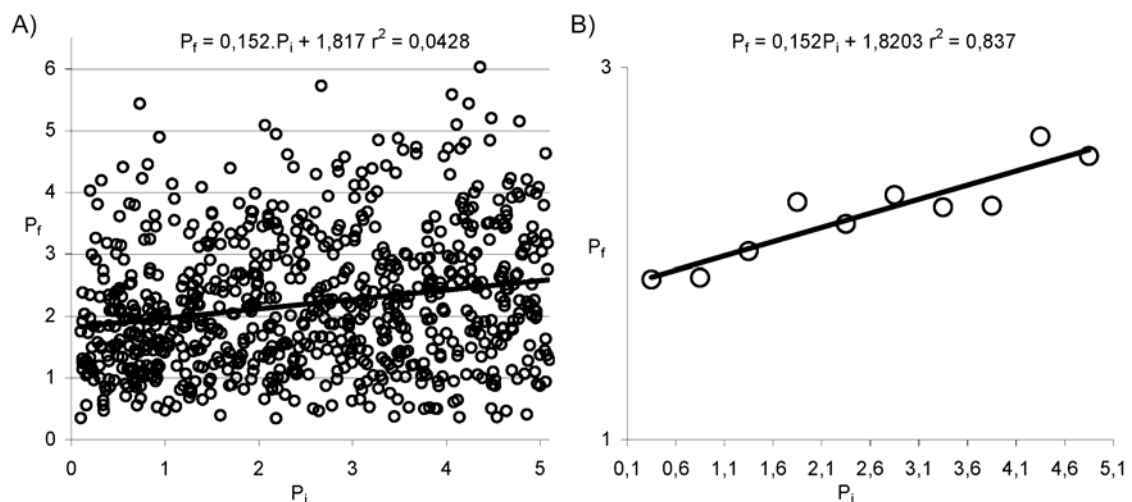


Figure 15. Représentation du phénomène d'attraction. A) Corrélation des 768 valeurs de P_i et P_f dans la population. La corrélation est significative (voir texte). B) Lorsque les P_i observées sont groupées par clusters de 0.5 s (10 groupes de valeurs) cette tendance est clairement visible. Chaque point représente la moyenne des P_f (de 65 à 94 observations par classes). Le centre des classes est pris comme référence en x. La corrélation est donnée à titre indicatif.

Ces analyses, qui révèlent les facteurs qui influencent le choix, n'ont d'autres buts que décrire le phénomène d'ajustement avec précision. Accessoirement, elles permettent également d'affiner l'estimation finale de la période moyenne préférée par les participants. A l'issue de ces deux sections consacrées, respectivement, à l'analyse de la distribution des observations et aux phénomènes de capture et d'attraction nous avons comptés, pour chaque participants, le nombre de valeur P_f restantes (hors extrêmes et captures) pour l'estimation des indices de tendance centrale et de dispersion. Les captures ont été extraites des données brutes à cause de leur double nature. S'il paraît acceptable d'inclure les captures lorsqu'elles coïncident avec la préférence moyenne des sujets, inclure des valeurs reflétant une inattention, voire une paresse des participants, semble moins acceptable. Par simplicité, toutes les valeurs capturées ont été exclues. Un minimum de 5 valeurs de P_f ajustées par sujet est fixé comme limite pour l'estimation des indices. Le nombre de sujets remplissant ce critère est de 103 (90,3 % de la population des sujets). Pour 46 % des sujets le nombre de valeurs P_f est égal à 8. Ces derniers n'ont pas été affectés par les procédures de filtrage. En fait, près de 80 % des sujets ont un nombre de valeurs P_f restantes ≥ 7 .

2.5 Tendances centrales et variabilités des P_f

D'une manière générale, les attitudes des sujets étaient variées face à l'écran. Les consignes étant relativement vagues, nous pensons que les sujets se sont inégalement investis dans la tâche. Certains semblent s'être fixés une référence pour les 8 essais ; d'autres expriment des préférences sensiblement différentes pour chaque essai (voir figure 12). Nous pensons que ces différences d'attitude contribuent pour une part importante à la variabilité inter et intra-individuelle mesurée.

Valeurs moyennes et dispersion des préférences perceptives. La figure 16 présente la distribution des 103 P_f moyennes calculées. Les minimums et maximums observés sont respectivement de 0.48 s et 4.9 s. La médiane de la distribution est à 2.12 s, la moyenne arithmétique est de 2.2 s ($\sigma = 0.97$ s). La vitesse moyenne du point est alors de l'ordre de 13.5 cm/s. Le gain de vitesse K est égal à 7.41 cm/s (voir *Stimuli*). L'asymétrie et l'aplatissement de la distribution des valeurs de P_f sont respectivement de 0.59 et 0.02. Le centre de la distribution est décalé vers les valeurs les plus élevées. La meilleure description des données est obtenue en utilisant une distribution Gamma. La table détaillée des répartitions, observées et théoriques (Gamma), est donnée en annexe 2. Les paramètres d'échelle et de forme sont respectivement de 0.45 et 4.86. La comparaison des fréquences observées et théoriques donne : $\chi^2 = 4,32$, $dl_{(ajustés)} = 6$, $p = ,63$.

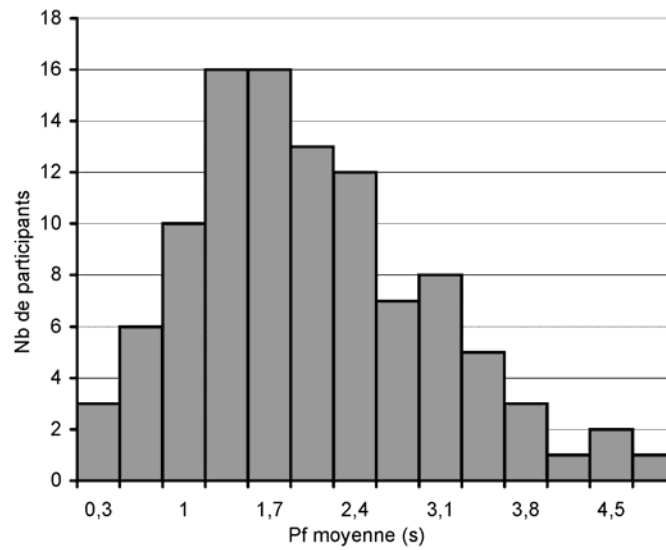


Figure 16. Répartition des 103 valeurs moyennes de P_f . L'échelle est linéaire, l'intervalle entre les classes est de 0.35 s. Les minimum et maximum sont respectivement de 0.48 s et 4.9 s. Le premier et troisième quartile ont pour valeur 1.52 s et 2.82 s. La médiane est à 2.12 s. La moyenne arithmétique est de 2.2 s ($\sigma = 0.97$ s).

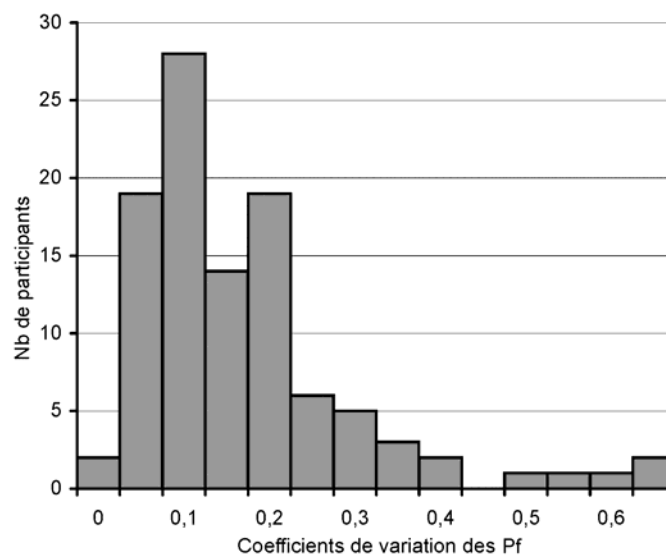


Figure 17. Répartition des coefficients de variation de la population testée ($n = 103$). Les valeurs minimales et maximales observées sont respectivement de 0.04 et 0.66. Le premier et le troisième quartile ont pour valeurs limites 0.11 et 0.23. 50% des observations sont comprises dans ces limites. La médiane est à 0.16, la moyenne arithmétique est de 0.19 ($\sigma = 0.12$). La répartition est de type Log-normale. La tendance centrale est donc plus fidèlement représentée par la moyenne géométrique (0.159).

Variabilité intra-individuelle des préférences perceptives. Une corrélation positive entre moyenne et écart type est observée ($\sigma = 0.118.P_f + 0.138$; $r = 0.41$; $F_{(1,101)}=20,82$; $p < ,01.$). Le coefficient de variation ($\sigma P_f/P_f$) est utilisé pour figurer la variabilité intra-individuelle. La figure 17 précise la répartition de cette variabilité.

La distribution est correctement décrite par une loi Log-normale ; $\chi^2 = 5,24$, $dl_{(ajustés)} = 5$, $p = ,38$. La distribution Log-normale est définie, pour $x > 0$, par $f(x) = 1/[\sigma x \sqrt{2\pi}] \exp [-(\ln x - \mu)^2 / (2\sigma^2)]$, où μ et σ représentent les paramètres d'échelle et de forme (dans notre cas, -1.83 et 0.37 respectivement). Une table détaillée des répartitions observées et théoriques est donnée en Annexe 3. La moyenne géométrique de cette distribution est de 0.159.

2.6 Analyses complémentaires

A l'issue des procédures de filtrage, le pourcentage de sujets féminins dans l'échantillon est de 57,3 % et le pourcentage de gaucher est de 12.6 %. Une version du test de Tuckey (HSD, Différence Significative Honnête), généralisé au cas des échantillons de tailles différentes, est utilisé pour tester l'effet de la latéralité et du sexe sur la moyenne arithmétique et sur la transformée Log des coefficients de variation des P_f . Le nombre de gauchers étant de 13 seulement, la population n'est pas divisée en 4 groupes. Les deux facteurs, latéralité et sexe, sont testés indépendamment (2 analyses avec un facteur inter-sujet à 2 modalités).

Effet de la latéralité. Les données remplissent la condition d'homogénéité des variances (test de Levene : $F_{(1,101)} = 1.83$; $p = 0.17$). Le faible nombre d'observations dans le groupe des gauchers invite cependant à prendre ce résultat avec précaution (le test de Levene est basé sur le modèle de l'ANOVA). La comparaison des moyennes par le test HSD de Tuckey donne $p = 0.51$. Le groupe de sujets droitiers ($n = 90$; $P_f = 2.27$ s ; $\sigma = 0.99$ s) ne diffère pas du groupe de sujets gauchers ($n = 13$; $P_f = 1.72$ s ; $\sigma = 0.69$ s).

Après transformation Log des valeurs des coefficients de variations les variances des deux groupes sont homogènes (test de Levene : $F_{(1,101)} = 0.81$; $p = 0.36$). Le test HSD n'indique pas de différences significatives ($p = 0.91$). Les moyennes des coefficients de variation (après transformation inverse des valeurs Log) sont de 0.16 et 0.15 pour les droitiers et les gauchers, respectivement.

Effet du sexe. Les variances des deux groupes sont également homogènes (Test de Levene : $F_{(1,101)} = 2.52$; $p = 0.11$). La moyenne du groupe de sujets du sexe féminin ($n = 59$; $P_f = 2.4$ s ; $\sigma = 1$ s) est supérieure à celle du groupe de sujets du sexe masculin ($n = 44$; $P_f = 1.93$; $\sigma = 0.86$ s). Le test HSD de Tuckey donne $p = .02$.

L'analyse de la variabilité, après transformation Log des valeurs, ne révèle pas de différences significatives (Test HSD ; $p = 0.46$). Les moyennes des coefficients de variation (après transformation inverse des valeurs Log) sont, respectivement pour les femmes et les hommes, de 0.16 et 0.15.

3. DISCUSSION

L'expérience qui vient d'être présentée avait pour but de tester l'existence d'une préférence perceptive pour la vitesse dans le cas du déplacement d'un point le long d'une trajectoire elliptique. La vitesse moyenne préférée a été associée à la valeur moyenne de la période finale choisie pour une révolution de l'ellipse (P_f). Dans un premier temps, les réponses individuelles et la distribution des données brutes dans la population ont été décrites. Deux phénomènes (capture et attraction) ont ensuite été défini pour décrire les variations de P_f associées à la valeur initiale P_i d'implémentation du stimulus. Ces analyses préliminaires ont été utilisées pour filtrer les données brutes et approcher au mieux la tendance centrale et la variabilité de la vitesse moyenne préférée. Finalement, des effets liés au sexe et à la latéralité du sujet ont été testé par l'analyse de la variance des indices calculés.

La préférence moyenne, calculée sur une population de 103 participants, correspond à une période de 2.2 s ($\sigma = 0.97$ s). La vitesse moyenne du point est alors de l'ordre de 13.5 cm/s. La valeur de P_f est nettement plus élevée que la moyenne des temps de mouvements mesurés lors de l'exécution d'ellipses comparables (1,2 s ; Viviani et Schneider, 1991). Nous avons vu cependant que cette estimation constitue une référence discutable du fait du faible nombre de sujets dans l'expérience citée. Plus simplement, reprenons les limites du premier et du troisième quartile (1.52 s et 2.82 s). Cet intervalle de 1,3 s contient 50 % des préférences moyennes. Notons, pour l'instant, que ces périodes sont compatibles avec les capacités d'exécution du système moteur. Les sujets ne préfèrent pas les périodes minimales d'implémentation (2.2 % de choix < 0.3 s) et les périodes supérieures à 6.075 s ne sont choisies que dans 2.5 % des cas.

Finalement, ce sont les prédictions basées sur les données issues des travaux sur la production de séquences rythmiques et extrapolées, dans l'hypothèse d'une segmentation en quart de cycle du mouvement elliptique, qui sont le plus compatibles avec nos résultats. Nous avons vu, dans l'introduction, que le tempo préféré moyen serait compris entre 100 et 120 bpm (0.5-0.6 s par cycle) et qu'une zone entre 81 et 162 bpm (0.37-0.74 s) pourrait contenir jusqu'à 70% des tempos préférés observés (Moelants). En admettant l'idée d'une segmentation de l'ellipse en quart de cycle, la P_f moyenne observée devrait se situer entre 2 et 2.4 s et 70% des périodes préférées devraient être incluses dans une zone comprise entre 1.48 et 2.96 s. Nos résultats indiquent que la P_f moyenne est à 2.2 s et que 50 % des P_f observées sont comprises entre 1.52 s et 2.82 s. Plus précisément, 55 % des observations sont contenues dans les limites prévues.

Toutefois, cette correspondance pourrait être fortuite. En effet, les prédictions faites étaient multiples (en fonction de la segmentation) ce qui augmente la probabilité de correspondance. Par ailleurs nous avons indiqués qu'une des difficultés associées à l'hypothèse d'un choix reflétant un tempo fondamental est que celui-ci n'est pas assimilable au temps de mouvement. Le temps de mouvement est fortement contraint par la forme et la longueur de la trajectoire, ce qui ne serait pas le cas d'un tempo fondamental, indépendant de l'exécution et déterminé par des horloges internes.

La variabilité intra-individuelle de l'estimation de P_f , mesurée par le coefficient de variation est de l'ordre de 0.16. Sur la base des seuils de discrimination pour la vitesse, des valeurs de l'ordre de 0.05 - 0.08 auraient pu être attendues. Cette différence de variabilité peut être attribuée à un certain nombre de facteurs. Nous avons vu, par exemple, que P_i constituait une source de variation de P_f . Nous nous sommes étendus sur ces phénomènes de capture et d'attraction car ils révèlent la possibilité de qualifier et de détailler des sources de variations potentielles de la préférence perceptive. Notez que compte tenu de l'effet d'attraction vu précédemment, nous pouvons dire que le tirage aléatoire permet sans doute d'obtenir la meilleure estimation de la préférence moyenne des sujets. Si P_i avait été fixe, l'estimation des P_f aurait été systématiquement biaisée.

Un effet qui pourrait être assimilé au phénomène d'attraction apparaît nettement dans les travaux de Viviani et Stucchi, (1992a). Dans cette étude, dont une des expériences est détaillée au point II.2.3, les auteurs notent pour deux expériences un effet de la valeur initiale de β (5 valeurs différentes) sur la valeur β_f (finale) calculée. Cet effet n'est pas discuté par les auteurs. Quoi qu'il en soit, dans cette expérience, le fait que l'état initial du stimulus détermine l'état final (la préférence du sujet) est tout à fait compatible avec les perspectives dynamiques. Le phénomène d'attraction a fait l'objet d'une étude plus détaillée qui ne sera pas développée dans cette thèse. La consigne est également une source de variation potentielle. Les sujets sont faiblement contraints dans leur choix. Il n'est pas explicitement demandé de choisir toujours la même vitesse. Certains sujets ont d'ailleurs tendance à varier de manière importante autour de la tendance centrale utilisée pour représenter leur préférence perceptive. L'écart type peut ainsi représenter jusqu'à 66 % de la valeur de P_f .

L'effet du facteur Sexe sur la P_f moyenne — se révèle significatif. Ce résultat n'est pas interprété. Il n'y a pas d'effet de l'orientation de l'ellipse (en rapport avec la main d'écriture des participants). La faible taille du groupe des sujets gauchers ($n = 13$) n'autorise cependant pas de conclusion définitive sur ce point. Quoi qu'il en soit, ces analyses étaient secondaires. Il s'agissait avant tout d'observer et de quantifier une préférence perceptive pour la vitesse d'un mouvement donné. Les résultats indiquent clairement une tendance des sujets à préférer des vitesses comprises entre 20 et 10 *cm/s*. Ces vitesses, quoique peu élevées, sont plausibles d'un point de vue moteur.

Nous avons dit dans la partie procédure que nous avons également demandé à la plupart des sujets, 1) ce que pouvait représenter le mouvement et 2) s'il avait fixé un point particulier de l'écran où s'il avait suivi le point des yeux. Ces questions ont été posées à plus de la moitié des sujets de l'expérience. Pour ce qui est de l'identité du mouvement, aucun des sujets n'a supposé qu'il s'agissait de quelqu'un traçant une ellipse, ou bien d'un mouvement humain. Généralement, les sujets ne savaient pas quoi répondre, dans la plupart des cas d'ailleurs, aucune réponse n'était donnée par le sujet. Dans les cas contraires, les sujets indiquaient que le stimulus faisait penser à un satellite, un électron, une lumière de discothèque ou encore à un jeu vidéo. C'est l'interprétation en terme de système physique qui était systématiquement avancée. Il est difficile de commenter ces observations parce que le stimulus présenté, bien que correspondant au modèle biologique est bien trop parfait pour un mouvement humain.

En ce qui concerne l'observation du point, les sujets indiquent qu'ils suivaient parfois le point des yeux, surtout au début ou pour vérifier leur choix, mais fixaient également une partie de l'ellipse à d'autres moments (généralement la partie supérieure ou inférieure du stimulus). L'observation des sujets permet également d'affirmer que des phases de poursuites alternent avec des phases de fixation durant la procédure d'ajustement.

Dans l'expérience suivante, nous allons rendre plus explicite la nature du stimulus présenté en indiquant au sujet qu'il s'agit d'un mouvement humain et qu'il doit imaginer que c'est lui qui réalise ce mouvement. Pour cela, nous avons manipulé la consigne donnée aux participants. L'idée est d'une part, d'encourager le sujet à imaginer le mouvement qui lui est présenté et d'autre part, de l'amener à porter son attention sur la régularité de ses ajustements, ceci afin de vérifier si la variabilité intra-individuelle observée peut être réduite.

VIII. PREFERENCE PERCEPTIVE ET MOUVEMENT IMAGINE

Dans l'expérience précédente, nous avons décrit avec précision la tendance centrale et la dispersion de la préférence perceptive pour la vitesse. La variabilité intra-individuelle de cette préférence a également été estimée. Le but de cette nouvelle expérience est de tester les effets d'une consigne de mouvement imaginé et d'une consigne de régularité.

Nous avons vu (chapitre IV) que le mouvement imaginé s'accompagne d'une activation de nombreuses structures nerveuses traditionnellement considérées comme motrices. Cette activité a été assimilée à un processus de simulation. Imaginer le mouvement c'est le simuler. L'ajustement de la période finale par les sujets sera-t-il différent dans cette situation ? Si c'est le cas, nous aurons l'occasion de comparer les résultats préférés et imaginés. Les différences pourraient concerner la période moyenne de référence, la dispersion de la population ou encore la dispersion des estimations individuelles. En revanche, si ce n'est pas le cas, nous nous trouverons dans une situation statistiquement inconfortable (test d'hypothèse nulle) mais qui serait toutefois compatible avec l'hypothèse que la préférence perceptive se construit sur une simulation motrice. La simulation serait en quelque sorte un processus par défaut, actif même lorsque les sujets n'imaginent pas que le mouvement est humain. Dans cette nouvelle expérience, l'accent sera également mis sur l'importance de la régularité des ajustements de la période préférée. Cette consigne devrait entraîner d'une réduction de la variabilité intra-individuelle. Nous pourrions ainsi préciser le rôle que joue l'attention sur la variabilité intra-individuelle mesurée précédemment. Nous n'attendons pas d'effet de cette consigne de régularité sur la tendance centrale des périodes ajustées.

1. METHODE

Comme dans l'expérience précédente, la méthode utilisée consiste à demander à un sujet d'ajuster la vitesse d'un point se déplaçant sur un écran. Dans cette nouvelle expérience, nous étudions en particulier l'effet de la consigne donnée au sujet.

1.1 Sujets

Cent cinquante huit étudiants et membres du personnel des universités de Grenoble, n'ayant pas participé à l'expérience précédente, ont participé à cette étude. Le pourcentage de sujets féminins dans l'échantillon est de 60.2 %, le pourcentage de gauchers est de 9 % et l'âge moyen est de $27 \pm 6,3$ ans.

1.2 Stimulus et procédure.

Cette expérience est, sous de nombreux aspects, similaire à la précédente. Le stimulus et le matériel sont identiques. Les modifications portent essentiellement sur la consigne lue par les sujets. Dans l'expérience précédente, la consigne présentée sur l'écran n'indiquait pas que le stimulus présenté pouvait être assimilé à un mouvement humain. Dans cette nouvelle expérience, la consigne donnée à une partie des sujets indiquait que le point en mouvement représentait une personne en train de tracer une ellipse sur une feuille avec un stylo. Il était précisé que le sujet devait imaginer que c'est lui qui traçait cette ellipse. Le sujet devait indiquer la vitesse qu'il imaginait en ajustant la vitesse du point sur l'écran. Le texte se poursuivait ensuite de la même façon que dans l'expérience précédente. La consigne de mouvement imaginé et la consigne classique « vitesse préférée » sont systématiquement croisés avec une consigne de régularité. Pour chaque groupe, il était ajouté ou non, à la suite de la dernière phrase écrite, « Vous devez indiquer 8 fois la même vitesse ». Les 4 consignes (C_1 : préférée/libre ; C_2 : préférée/régulier ; C_3 : imaginée/libre ; C_4 : imaginée/régulier) forment un plan inter-sujet comprenant deux facteurs (nommés tâches et contraintes) à deux modalités. Les sujets étaient aléatoirement assignés à une des 4 conditions expérimentales. Comme dans l'expérience précédente les P_i et P_f des 8 essais ainsi que le sexe, l'âge et la latéralité (main couramment utilisée pour écrire) du sujet étaient enregistrés.

2. RESULTATS

Les données comprennent, pour chaque sujets, 8 paires de valeurs P_i et P_f représentant, respectivement, les périodes initiales et finales du stimulus. L'analyse de ces résultats comprend plusieurs étapes. Comme dans l'expérience précédente, et pour chaque groupe (C_1 ; C_2 ; C_3 ; C_4), les observations extrêmes ont été filtrées et les valeurs de P_f associées aux captures ont été retirées des données brutes. Un minimum de 5 valeurs de P_f est pris comme limite pour le calcul des indices. Une description détaillée des données brutes par groupe et des conséquences des procédures de filtrage est donnée en annexe 4. Les résultats présentés ici concernent uniquement les tendances centrales et la variabilités des P_f .

2.1 Périodes finales : tendances centrales et variabilités

A l'issue des procédures de filtrage, l'effectif par groupe est de : C_1 , $n = 38$; C_2 , $n = 34$; C_3 , $n = 34$; C_4 , $n = 35$). L'analyse porte sur 93 % de la population initiale. La figure 18 présente la distribution des P_f moyennes et des coefficients de variation mesurés dans chaque groupe.

Moyenne et dispersion des P_f moyennes. Pour la moyenne des P_f , la tendance centrale et la dispersion des distributions sont approchées par la moyenne arithmétique et l'écart type. Les calculs donnent : C_1 , 2.47 ± 1.26 s ; C_2 , 2.24 ± 0.72 s ; C_3 , 2.33 ± 1.1 s ; C_4 , 2.38 ± 1.05 s. Ces valeurs sont sensiblement plus élevées que celles reportées dans la partie expérimentale précédente (voir figure 16 et 17). La moyenne arithmétique était de 2.2 s ($n = 103$) ici, elle est de 2.36 s ($n = 143$). L'écart type était précédemment de 0.93 s, il est ici de 1.01 s. Ces variations de tendance centrale (7 %) et de dispersion (8 %) sont considérées comme négligeables. La faible dispersion du groupe C_2 est clairement visible sur la figure 8. Toutefois, le test de Levene ($F_{(3,137)} = 2.17$; $p = 0.09$) ne détecte pas une hétérogénéité des variances des 4 groupes. Les effectifs des groupes sont suffisamment proches pour utiliser l'ANOVA, plus sensible que le test de Tuckey. Le plan d'analyse inter-sujets comprend un facteur « tâche » à deux modalités (préférée/imaginée) et un facteur « contrainte » (libre/régulier). Le croisement de ces deux facteurs résume les quatre consignes présentées aux sujets. Comme la simple observation des moyennes le laissait supposer, aucun effet n'est détecté par l'analyse. Les deux facteurs et leur interaction contribuent pour moins de 1 % à la variance des données recueillies.

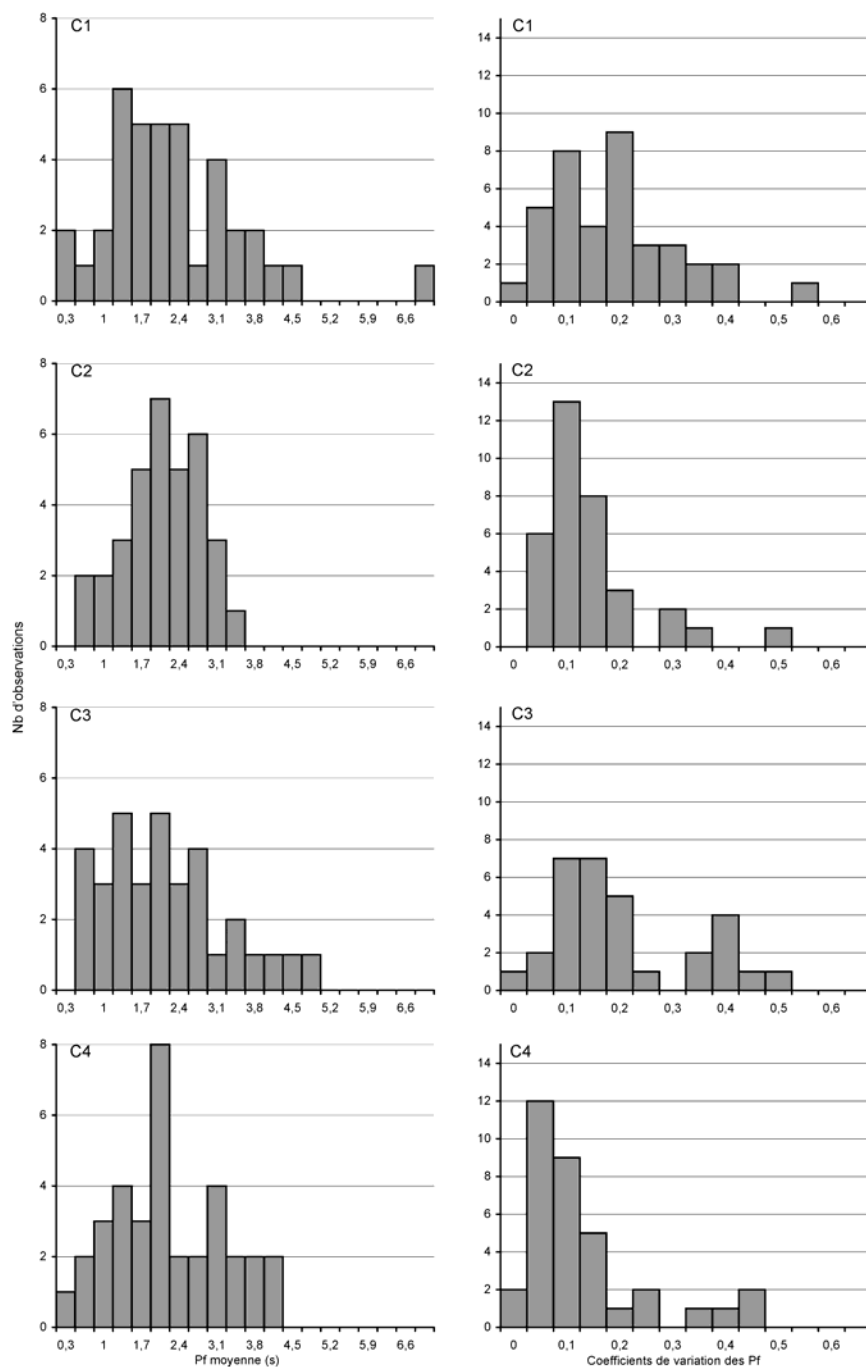


Figure 18. La colonne de gauche présente la distribution des P_f moyennes pour les 4 groupes (de C_1 à C_4 , de haut en bas). Les limites des premiers et troisièmes quartiles de ces distributions sont respectivement : C_1 , 1.65-3.11 s ; C_2 , 1.72-2.86 s ; C_3 , 1.62-2.89 s ; C_4 , 1.64-3.23 s. Les médianes pour les conditions C_1 à C_4 sont, dans l'ordre : 2.26, 2.27, 2.18 et 2.22 s. Un simple regard suffit pour constater que les quatre distributions de valeurs moyennes sont, à-peu-près, superposables. La colonne de droite présente les distributions des coefficients de variations mesurés dans les 4 populations recrutées. Les limites des premiers et troisièmes quartiles de ces distributions sont respectivement : C_1 , 0.11-0.27 ; C_2 , 0.1-0.17 ; C_3 , 0.13-0.39 ; C_4 , 0.07-0.17. Les médianes pour les conditions C_1 à C_4 sont, dans l'ordre : 0.2, 0.13, 0.2 et 0.12 s. Dans les groupes C_1 et C_3 la distribution des coefficients de variation est plus étalée. La consigne de régularité donnée aux groupes C_2 et C_4 semble avoir eu un impact non négligeable sur la variabilité intra individuelle. Certains sujets ont, toutefois, été très variables dans ces conditions (notez les maximums autour de 0.55 dans les quatre groupes).

Coefficients de variation des périodes finales moyennes. En ce qui concerne l'analyse des coefficients de variation (figure 18, colonne de droite), les traitements statistiques sont effectués sur les valeurs transformées (log). Le test de Levene ($F_{(3,137)} = 1.50$; $p = 0.21$) ne signale pas d'hétérogénéité des variances des 4 groupes. L'analyse de variance ($2_{\text{tâches}} * 2_{\text{contraintes}}$) indique un effet principal du facteur « contrainte » ($F_{(1,137)} = 14.8$; $p < 0,01$). Lorsque la consigne précise que la même vitesse doit être ajustée pour les 8 essais, le coefficient de variation intra-individuel moyen diminue (libre = 0.2 ; régulier = 0.13). Il n'y a pas d'effet du facteur « tâche » (pas de différence significative entre vitesse préférée et vitesse imaginée) ni d'effet d'interaction entre les deux facteurs (tâche et contrainte). Il est remarquable que les situations « libre » (C_1 et C_3) s'accompagnent d'une variabilité moyenne relativement élevée comparée à la valeur de 0.16 mesurée dans l'expérience précédente.

2.2 Analyses complémentaires

Le nombre total de sujets du sexe féminin est de 86 ce qui représente 60,1 % de la population filtrée. Cette répartition varie selon les conditions (C_1 , 0.68 ; C_2 , 0.56 ; C_3 , 0.5 ; C_4 , 0.66). En dépit de ces différences d'effectifs, nous avons inclus le facteur « sexe » dans une seconde analyse des périodes moyennes P_f . Le plan d'analyse inclut les facteurs « sexe », « tâche » et « contrainte ». Le test de Levene ($F_{(7,133)} = 1.96$; $p = 0.06$) ne signale pas d'hétérogénéité des variances des 8 groupes. Le test HSD de Tuckey pour n différents ne révèle aucune comparaison significative entre les différents groupes.

Le nombre de sujets gauchers dans la population filtrée est encore une fois faible ($n = 13$) et la fréquence dans les groupes varie entre 0 % (C_2) et 17 % (C_4). Nous n'avons donc pas testé l'effet de cette variable étiquette.

3. DISCUSSION

L'expérience qui vient d'être présentée avait pour but de tester 1) l'effet général d'une consigne de mouvement imaginé sur les périodes finales P_f et, 2) l'effet spécifique d'une consigne de régularité sur la variabilités des 8 ajustements individuels de P_f .

Pris dans leur ensemble les valeurs obtenues sont sensiblement les mêmes que dans l'expérience précédente. Les limites du premier et du troisième quartile (1.64 s et 3.05 s) sont très proches des valeurs précédemment mesurées (1.52 s et 2.82 s). Les extrêmes, les médianes, les moyennes et les écarts types sont comparables (voir annexe 4). L'analyse par condition suggère que la consigne de mouvement imaginé ne modifie pas la période moyenne choisie par les participants. Cette consigne n'affecte pas non plus la variabilité intra individuelle. Le seul effet significatif, logiquement attendu, concerne l'effet de la consigne de régularité. Le coefficient de variation des sujets peut être diminué de près de 35 % en attirant l'attention des sujets sur la régularité — attendue par l'expérimentateur — des ajustements. Cette contrainte n'est pourtant pas suivie par tous les sujets. Dans les 4 conditions (C_1 ; C_2 ; C_3 ; C_4), les valeurs des coefficients de variation sont comprises entre 0.04 et 0.6 et des données aberrantes sont observées dans tous les groupes (voir annexe 4). Les réponses des sujets dans la situation « mouvements imaginés » ne se distinguent en rien de celles obtenues dans la situation « préférences perceptives ». Les deux études offrent le même résultat : la vitesse moyenne préférée par les sujets correspond à une période de 2.2 – 2.4 s. Il faut noter que cette durée représente le double des temps de mouvements reportés dans l'étude de Viviani & Schneider (1991).

Dans les deux expériences que nous venons de présenter, la période initiale est tirée au hasard entre 0.1 s et 5.1 s. La fonction utilisée est une fonction d'équipartition avec une distribution normale de l'erreur. La loi forte des grands nombres permet d'affirmer que la tendance centrale des valeurs de P_i échantillonnées convergent vers une moyenne de 2.6 s. La moyenne réelle des 2176 valeurs de P_i échantillonnées

pour les deux expériences est de 2.58 s ($\sigma = 1.43$ s). Cette valeur est proche de la tendance centrale des moyennes des P_f mesurée dans la population (2.2 – 2.4 s). Les mesures effectuées jusqu'à présent pourraient-elles n'être qu'artefacts ? La variabilité inter-individuelle mesurée, permet raisonnablement d'écarter cette hypothèse. Nous verrons que les résultats de la partie expérimentale suivante confirment ce point de vue.

Dans l'expérience qui suit, les aspects temporels de la production et de la perception de mouvements similaires sont directement comparés. La longueur et la forme des stimuli dynamiques sont manipulées pour vérifier si la vitesse préférée, ou plus précisément sa modulation, révèle l'existence au plan perceptif de lois semblables à celles qui décrivent l'exécution des mouvements humains.

IX. PREFERENCE PERCEPTIVE ET PRINCIPES MOTEURS

Les chapitres consacrés à la loi motrice de co-variation entre vitesse et courbure et aux mouvements imaginés montraient que les mouvements humains obéissaient à des principes moteurs qui diffèrent selon la nature du mouvement.

Dans le cas des mouvements de traçage et d'écriture effectués sans contraintes temporelles, la vitesse moyenne du mouvement dépend de la longueur de la trajectoire. En conséquence, le temps de mouvement s'accroît relativement faiblement lorsque l'amplitude du geste est augmentée (Michel, 1971 ; Viviani & McCollum, 1983; Viviani & Schneider, 1991 ; Viviani & Flash 1995). L'étude de ce phénomène, qualifié de « principe d'isochronie » par Viviani et collaborateurs (1991 ; 1995) a permis de distinguer deux composantes contribuant à la modulation de la vitesse moyenne du mouvement par la longueur de la trajectoire, précisant ainsi la définition du principe d'isochronie. La loi de puissance deux-tiers permet, en effet, de distinguer la modulation de la vitesse moyenne du mouvement due au gain de vitesse K de celle due à l'augmentation de la courbure moyenne de la trajectoire. Les deux composantes entraînent une augmentation de la vitesse moyenne du mouvement toutefois, les auteurs précisent que c'est la modulation du gain de vitesse K qui représente l'essence du phénomène d'isochronie. En dépit de ces précisions, la raison pour laquelle le terme K croît avec la longueur de la trajectoire reste inexpliqué. La tendance à l'isochronie est également observée dans le cas des mouvements rectilignes sans contraintes spatiales (Michel, 1971). Dans tous les cas, la relation entre l'amplitude et la durée du mouvement peut être décrite par une fonction de puissance.

Pour les mouvements de pointages, qui sont généralement des mouvements à contraintes spatiales fortes, on observe un fonctionnement moteur différent. La vitesse moyenne dépend, en plus de la distance à parcourir, de la précision déterminée par la taille de la cible. Cette relation entre vitesse et précision a été décrite par Fitts (1954) dans le cas de mouvements répétitifs (aller et retour entre deux bandes), mais aussi dans le cas de séquences discrètes (Fitts & Peterson, 1964). De nombreux travaux ont analysé les caractéristiques de la relation entre vitesse et précision (Meyer et al, 1990 ; Plamondon & Alimi, 1997). Bien que la question de l'origine de la loi de Fitts soit encore discutée, il est admis que la relation entre l'indice de difficulté (distance/diamètre de la cible) et le temps de mouvement est logarithmique.

Selon le type de mouvement réalisé, les contraintes de distance et de précision mettent en jeu, à des degrés divers, deux modes de contrôle différents et complémentaires. Lorsque les mouvements peuvent être entièrement planifiés, et donc que les corrections sous contrôle de la vision sont réduites, le principe d'isochronie est observé. La vitesse du mouvement dépend alors essentiellement de la longueur de la trajectoire. En revanche, lorsque des contraintes spatiales impliquent l'utilisation complémentaire de la planification et du contrôle visuel, c'est une relation de type Fitts qui est observée. Qu'en est-il en perception ? Dans cette nouvelle expérience, l'objectif sera d'analyser la préférence perceptive pour des stimuli représentant des tracés d'ellipses, des mouvements rectilignes et des mouvements de pointages de différentes amplitudes. Nous allons donc manipuler la taille et la forme des stimuli proposés et mesurer les caractéristiques temporelles de la perception et de la production de ces mouvements.

Si la préférence perceptive s'appuie sur une simulation motrice intériorisée nous devrions observer une co-variation entre temps et amplitude spécifique du type mouvement présenté. Un phénomène assimilable au principe d'isochronie devrait être observé pour les tracés d'ellipses et les mouvements d'aller et retour sans cible (faibles contraintes spatiales). En revanche, lors de la perception de mouvements de pointage entre deux cibles, les préférences perceptives devraient être différentes de celles mesurées dans la condition trait.

Il sera également possible de comparer les durées préférées et exécutées afin de vérifier si une différence existe entre les deux modalités. La comparaison des caractéristiques temporelles de la perception et de la production devrait permettre de répondre à cette question, brièvement abordée aux points VII.3 et VIII.3.

1. METHODE

Dans cette expérience, nous analysons la relation entre l'amplitude et la durée des mouvements de tracés (ellipse et trait) et de pointages. Les caractéristiques temporelles de la perception et de la production de ces trois types de mouvements sont mesurées de telle sorte que les deux modalités puissent être comparées. La méthode utilisée pour tester la perception et la production est présentée dans deux sections distinctes.

1.1 Sujets

Quarante-deux sujets âgés de 17 à 47 ans (moyenne = 23 ans ; $\sigma = 5.5$ ans) participent à cette expérience. Les sujets étaient tous des étudiants en 1ère et 2ème année de psychologie à l'université de Grenoble. Ils étaient récompensés par 1 point d'expérience, en fait, 1 point supplémentaire pour un examen dans une matière à dominante expérimentale. Tous les sujets avaient une vue normale ou corrigée vers la normale.

1.2 Tâche de perception visuelle : matériel et procédure

Préparation des stimuli. Les stimuli utilisés ont été construits pour figurer trois types de mouvements : tracés d'ellipses, de traits ou de pointages. Les stimuli, générés par calcul, étaient constitués chacun par 400 paires de coordonnées cartésiennes (x, y) spécifiant la cinématique du mouvement d'un point ($\varnothing = 0.45$ cm) sur un fond d'écran blanc. La Figure 19 montre la trajectoire et le profil de vitesse tangentielle correspondants aux conditions « ellipse », « pointage » et « trait ».

La condition « ellipse » a été abondamment décrite dans la partie expérimentale précédente. Dans les conditions « pointage » et « trait » la même cinématique est utilisée (figure 19 D). Une cible est simplement ajoutée sur l'écran pour figurer la situation de pointage. La trajectoire et le profil de vitesse de ce mouvement d'aller et retour ont été dérivés du modèle utilisé pour l'ellipse. Le semi-axe ratio a simplement été fixé à 10^{-3} . L'excentricité d'une telle ellipse étant quasiment nulle, la trajectoire peut être considérée comme rectiligne (figure 19 C). Cette dernière est orientée à 45° comme dans le cas de l'ellipse. Le profil de vitesse obtenu pour un aller et retour est

parfaitement symétrique, sans sous-mouvements identifiables (Figure 19 D). Les coordonnées cartésiennes du point aux extrêmes de la trajectoire étaient répétées une fois. Le point marquait donc une pause, généralement imperceptible ($1/400^{\text{ème}}$ de la période totale). Dans la condition pointage, deux cibles ($\varnothing = 8 \text{ mm}$) apparaissaient sur l'écran 0.5 s avant le début du mouvement.

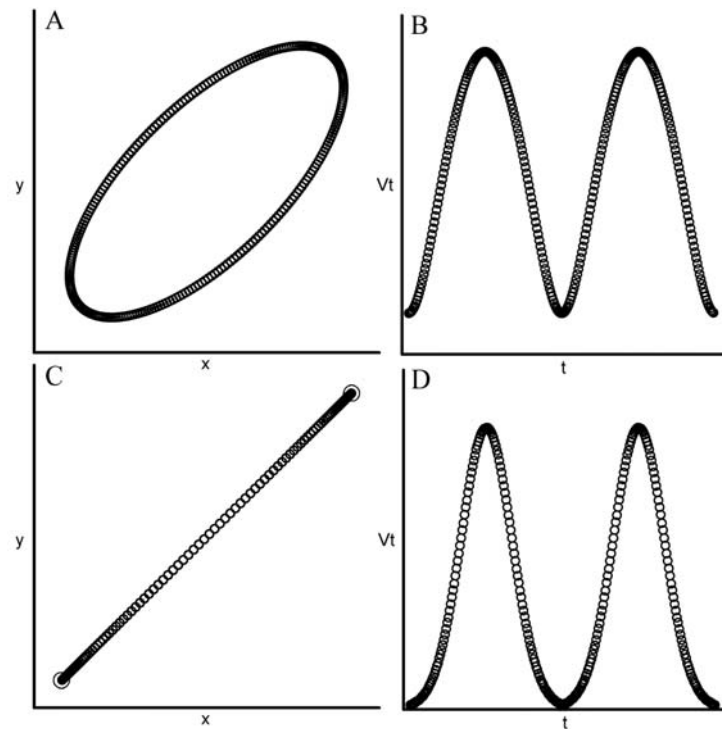


Figure 19. Trajectoires (A et C) et profils de vitesse tangentielle (B et D) du point dans les conditions ellipse et pointage. Le cas de l'ellipse a été décrit dans la partie expérimentale précédente. La trajectoire (C) du pointage représente un aller-retour entre deux cibles ($\varnothing = 8 \text{ mm}$). Le profil de vitesse correspondant (D) est parfaitement symétrique avec un pic de vitesse situé à mi-distance entre les deux cibles. La trajectoire présentée et le profil de vitesse tangentielle correspondant sont identiques pour les conditions « trait » et « pointage ». La seule différence est l'absence de la cible dans la condition « trait ».

Présentation des stimuli. La présentation des stimuli est réalisée avec le matériel employé dans les expériences précédentes. Le logiciel utilisé permet de manipuler indépendamment la longueur (l) de la trajectoire ($l = \text{périmètre}$ pour l'ellipse et $l = \text{distance} \times 2$ pour le pointage et le trait) et la période (P) d'un cycle du mouvement ($P = \text{durée d'une révolution}$ pour l'ellipse et d'un aller-retour pour le pointage ou le trait). Les longueurs des trajectoires présentées sur l'écran étaient identiques pour les trois

types de mouvements. Six valeurs ont été choisies de telle sorte que la longueur $l = 1.6558e^{0.5778x}$, où x = numéro du stimulus (de 1 à 6). Les longueurs de trajectoire correspondantes sont : $l_1 = 2.95 \text{ cm}$; $l_2 = 5.25 \text{ cm}$; $l_3 = 9.37 \text{ cm}$; $l_4 = 16.69 \text{ cm}$; $l_5 = 29.75 \text{ cm}$; $l_6 = 53.02 \text{ cm}$.

Comme dans la partie expérimentale précédente, la période (P) était calculée par rapport au nombre de paires (x, y) définissant la trajectoire. La limite inférieure de P était de 0.05 s . Lors de l'apparition du point sur l'écran la période initiale (P_i) était fixée aléatoirement pour chaque essai (équipartition entre 0.1 s et 5.1 s). Les sujets pouvaient ajuster ces périodes (par pas de 0.025 s) à l'aide du clavier. La période finale (P_f) choisie par le sujet constitue la variable dépendante analysée en perception.

Mesure de la préférence. La procédure est similaire à celle utilisée dans les expériences précédentes. Le sujet est assis face à l'écran et doit ajuster la vitesse du point (figure 20 A). Dans cette nouvelle expérience toutefois, la consigne précise qu'il s'agit « d'un mouvement humain, que c'est quelqu'un qui trace cette ellipse ». La tâche consiste à indiquer la vitesse qui semble la plus « naturelle et spontanée ».

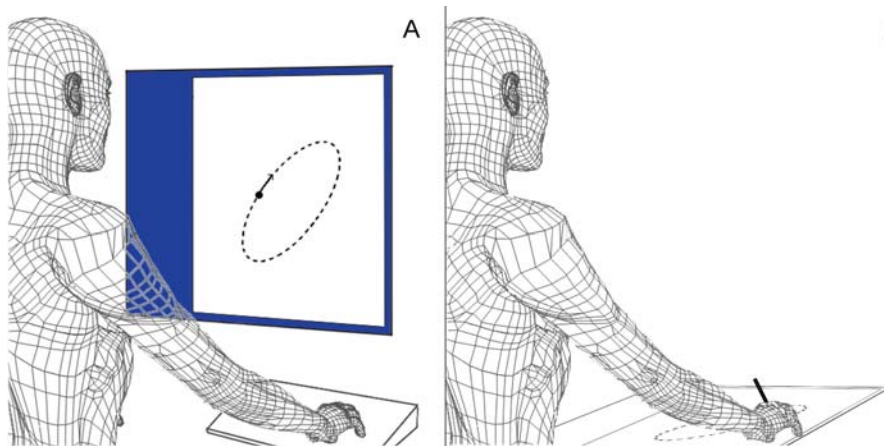


Figure 20. Dans cette expérience, la période ajustée sur l'écran (A) et le temps de mouvement (B) sont estimés. Il s'agit ici du cas de l'ellipse. Les situations trait et pointage sont en tout points similaires. Seule la cinématique du mouvement présenté (figure 1), et le modèle fournis au sujet changent. Quelque soit le type de mouvement figuré, six longueurs de trajectoires sont utilisées (voir texte). Les trajectoires présentées sur l'écran et les modèles de production ont la même longueur. Sur l'écran, comme sur la tablette, les trajectoires sont toujours centrées par rapport à la surface de présentation.

1.3 Tâche de production : matériel et procédure

Modèles de trajectoire. Trois séries de 6 modèles de trajectoires (en pointillés gris foncés, épaisseur = 0.01 cm) étaient utilisées pour indiquer au sujet l'amplitude du mouvement à exécuter. Les modèles étaient à l'échelle des trajectoires présentées sur l'écran. Dans la condition pointage, les cibles ($\varnothing = 8\text{ mm}$) étaient également présentes sur ces étalons.

Enregistrement des mouvements. Le sujet doit dessiner des ellipses, tracer des traits ou réaliser des pointages en continu à une vitesse « naturelle, spontanée » à l'aide d'un stylo sur une tablette graphique (figure 20, B). Le stylo ne laisse pas de trace. Il est précisé que les modèles sont donnés pour se faire une idée de la forme mais qu'il ne s'agit pas de recopiage. Il est demandé d'être « naturel » et « spontané ». Dans le cas des mouvements de pointage, il est précisé que les allers et retours doivent toujours être faits entre les deux cibles et qu'il s'agit d'être précis. Les conditions d'enregistrement des mouvements sont similaires à celles de l'expérience anticipation perceptive et mouvement imaginé. Le déplacement du stylo est enregistré pendant un délai variable correspondant, au minimum, à 5 cycles du mouvement requis (estimation faite par l'expérimentateur). L'essai était recommencé si, pour une raison quelconque, ce minimum n'était pas atteint.

Analyse des mouvements. Les trois types de mouvements (ellipse, trait, pointage) sont enregistrés par l'intermédiaire d'une tablette graphique (Wacom® Intuos™ A3 ; échantillonnage, 200 Hz ; résolution spatiale, 0.2 mm). L'estimation de la durée des périodes de révolution et de la longueur des trajectoires est réalisée sur la base des coordonnées x, y enregistrées par la tablette. L'ensemble des paires de coordonnées résumant la trajectoire est centré sur zéro (figure 21, A et C). La distance entre chaque positions mesurées — définies par les coordonnées x, y — et le centre de la distribution des points (0 ; 0), est estimée par le vecteur $\sqrt{(x^2 + y^2)}$. Les coordonnées associées à la valeur maximale locale du vecteur calculé donnent les extrémités inférieures et supérieures des trajectoires de l'ellipse et du pointage. Les paires de coordonnées comprises entre trois maximums définissent un cycle du mouvement. Le temps de mouvement et la longueur de la trajectoire de chaque cycle sont estimés. Le temps de mouvement est donné par le nombre de paires $(x, y) * 0.005\text{ s}$. La longueur de la trajectoire est estimée par la somme, pour chacun des cycles extraits, des distances entre deux paires de coordonnées (en cm). L'exemplaire qui minimise l'erreur de longueur de trajectoire (relative au modèle utilisé) est sélectionné (figure 21, B et D).

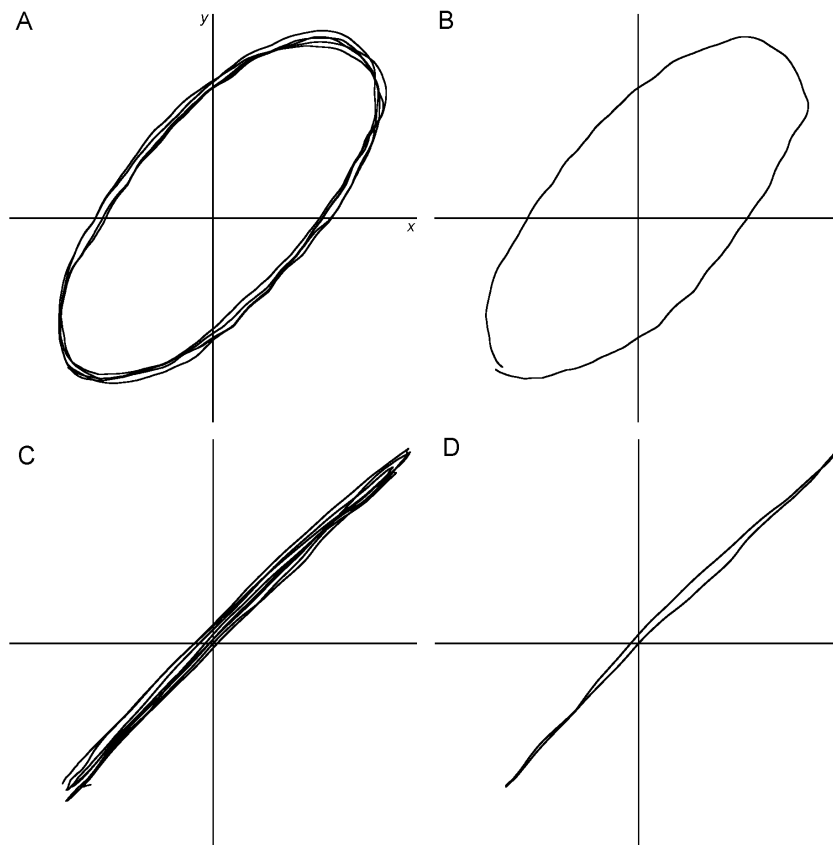


Figure 21. Analyse de la production motrice. Les graphiques représentent les trajectoires effectuées par les sujets dans les conditions ellipse et pointage (A et C). Le centre de moment de l'ensemble de points résumant la trajectoire est centré sur zéro. La distance entre chaque position mesurée — définie par les coordonnées x, y — et le centre de la distribution des points, est estimée par le vecteur $\sqrt{x^2 + y^2}$. Les coordonnées associées à la valeur maximale du vecteur calculé définissent les extrémités inférieures et supérieures des trajectoires de l'ellipse et du pointage. Les paires de coordonnées comprises entre deux minimums définissent un cycle du mouvement. Le temps de mouvement et la longueur de la trajectoire de chaque cycle sont estimés. L'exemplaire qui minimise l'erreur de longueur de trajectoire (relative au modèle utilisé) est sélectionné (B et D). La procédure est équivalente pour le trait et le pointage. Dans le cas du pointage une courte pause entre deux cycles est parfois observée. Pendant un court instant, la vitesse est nulle. Ces intervalles de temps, qui ne sont pas du temps de mouvement, proprement dit, ont été extraits pour l'estimation de la durée de chaque exemplaire du mouvement.

1.4 Procédure

Chaque sujet est assigné à une condition et une seule : « ellipse », « trait » ou « pointage ». La population est donc divisée en trois groupes de 14 sujets. En revanche, chaque sujet participe aux deux tâches (perception et production). L'ordre de passation des parties perception et production est contrebalancé. Une pause de quelques minutes sépare les 2 tâches. Pour la perception, comme pour la production, les 6 longueurs de trajectoire sont présentées aléatoirement. Le sujet ajuste la vitesse, ou exécute le mouvement demandé, pour la série de 6 longueurs puis recommence une nouvelle série aléatoire. Les sujets effectuent 7 séries. En résumé, chaque sujet réalise 7×6 ajustements

et 7*6 mouvements. Une brève explication du but de l'expérience est donnée aux participants. L'expérience dure environ une heure.

1.5 Filtrage des valeurs de P_f

Dans la tâche de perception et dans la tâche de production une période finale est mesurée. La même abréviation, P_f , est donc utilisée pour désigner la période finale choisie (préférée) ou produite (spontanée). Le même filtrage est appliquée aux données recueillies dans les deux modalités.

Perception. Les 7 périodes finales ajustées (P_f) pour chaque longueur de trajectoire sont d'abord moyennées. Les valeurs de P_f situées à $\pm 1.96 \sigma$ sont éliminées. Cette procédure écarte 40 des 1764 P_f mesurées, soit 2.2 % des observations. Il n'est fait aucun cas du phénomène de capture évoqué dans les expériences précédentes. Le nombre de valeurs de P_f restantes par sujets est compté ($n \geq 40$ pour plus de 90% de la population).

Production. Comme pour les données de la tâche de perception, les périodes des 42 cycles sélectionnés par sujets sont groupées par longueur et la procédure de filtrage mentionnée plus haut est également appliquées sur ces données. Cette procédure écarte 45 des 1764 P_f mesurées (2.5 % des observations). Le nombre de valeurs de P_f restantes est également compté ($n \geq 40$ pour 90% de la population). Les longueurs des trajectoires exécutées peuvent être sensiblement différentes du modèle présenté. Des déviations de l'ordre de ± 20 à 30 % sont observées pour certains essais (excepté dans la condition pointage où la longueur est très proche, quoique légèrement supérieure au modèle). Toutefois, lorsque les longueurs moyennes sont calculées, les déviations sont généralement inférieure à 8 %. Seule la plus courte des trajectoires ($l_1 = 2.95 \text{ cm}$) diffère sensiblement du modèle (+ 15 %). Compte tenu des faibles différences entre les longueurs des modèles et les longueurs réellement produites, les temps de mouvements mesurés ont été normalisés sur la valeur des longueurs modèles. Les longueurs de trajectoires finalement prises en comptes pour l'analyse de la relation entre P_f et l sont donc les mêmes pour la production et la perception.

2. RESULTATS

La présentation des résultats comprend 4 étapes. Dans un premier temps, les P_f moyennes sont représentées en fonction de la longueur (l) de la trajectoire. Ensuite, la relation entre P_f et l est caractérisée pour chaque individu par une analyse de régression. L'objectif de cette expérience était 1) de vérifier si la modulation de P_f par l en perception dépend du type de mouvement présenté et 2) de comparer les caractéristiques temporelles de la perception et de la production de ces trois types de mouvements.

Les effets des facteurs « mouvement », « modalité » et « ordre » seront testés par une analyse de la variance des 3 paramètres de régressions utilisés pour décrire la relation de P_f et l . Le plan d'expérience permet de tester l'effet de l'ordre de passation. La correspondance des résultats obtenus en perception et en production pourrait être meilleure si la tâche de production était réalisée en premier (hypothèse d'amorçage de la perception par la production).

Finalement, les caractéristiques temporelles de la perception et de la production des sujets sont corrélées séparément pour chaque ordre de passation. Puisque les sujets sont testés dans les deux modalités, une corrélation entre les deux mesures devrait confirmer le fait que la perception et la production sont déterminés par un facteur commun, propre au sujet.

2.1 Relation entre P_f et l : résultats moyens

L'objectif de cette première analyse est de décrire la relation entre la période finale (P_f) et la longueur de la trajectoire (l). La figure 22 représente les moyennes et les écarts types des valeurs de P_f (moyenne par individu puis moyenne sur le groupe) en fonction de la longueur de la trajectoire pour les deux modalités et les trois mouvements testés (ellipse, trait, pointage). Les écarts types au niveau du groupe sont proportionnels à la moyenne du groupe. En effet, les valeurs du coefficient de variation σ/P_f sont

relativement constantes pour chaque longueur de trajectoire l . Les coefficients de variations moyens sont de 0.47 (min = 0.41 ; max = 0.57) et 0.46 (min = 0.40 ; max = 0.52) pour la perception et la production respectivement. Les P_f moyennes semblent plus importantes dans la modalité perception que dans la modalité production. Par ailleurs, les P_f moyennes semblent nettement plus importantes dans la situation pointage que dans les situations ellipse et trait. Ces observations seront testées statistiquement dans les sections suivantes.

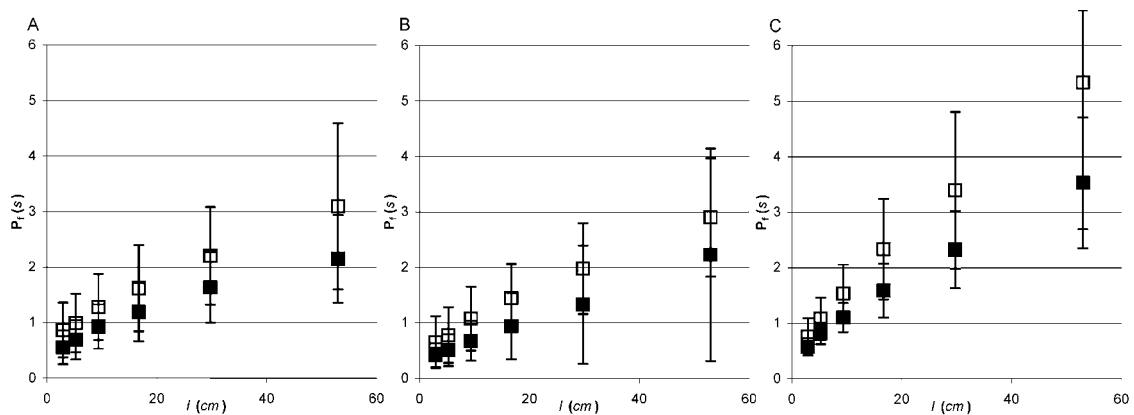


Figure 22. Moyennes et écarts types des valeurs de P_f en fonction de la longueur de la trajectoire (l) pour les deux modalités (perception, carrés blancs ; production, carrés noirs) et les trois types de mouvements testés (A, « ellipse » ; B, « trait » ; C, « pointage »). L'effet de l'ordre est ici moyenné et sera analysé en détail par la suite. Les indices de tendance centrale et de dispersion sont calculés sur $14_{(\text{sujets})} * 7_{(\text{sessions})}$ observations. Les temps de mouvements préférés sont plus importants que les temps de mouvements réels. Il semble, par ailleurs, que les P_f moyennes sont plus importantes dans la situation pointage que dans les situations ellipse et trait. Notez que la relation entre P_f et l peut être décrite par une fonction de puissance.

Il est remarquable que la P_f moyenne pour l'ellipse 5 ($l = 29,75 \text{ cm}$ dans cette nouvelle expérience) est de 2.2 s ($\sigma = 0.87 \text{ s}$) en perception. Ce résultat est similaire à celui des expériences portant sur la préférence perceptive. La production d'une ellipse comparable s'effectue en moyenne en 1.63 s ($\sigma = 0.63 \text{ s}$). L'effet de l'ordre n'est pas représenté dans la figure 22 (les données sont moyennées). Ce facteur sera également analysé en détail dans les parties suivantes.

2.2 Analyse de régression

La figure 23 résume la première étape de l'analyse proprement dite. La relation de P_f et l est décrite par une fonction de puissance ($P_f = P_o l^\gamma$). Les paramètres (γ , $\log P_o$ et ρ) sont estimés par une régression linéaire des valeurs $\log P_f$ et $\log l$. L'exposant γ représente l'influence de la longueur de la trajectoire sur la période. Plus il est proche de 0 plus le principe d'isochronie est prégnant. Le facteur P_o représente une période (en s) propre à chaque sujet et théoriquement constante pour l'ensemble des essais. Cette période peut être exprimée sous la forme d'un tempo ($1/P_o$ ou, en *bpm*, $60/P_o$). Finalement, la valeur du coefficient de corrélation ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) est un indicateur de la dispersion du nuage de point autour de la droite de régression. Une valeur de ρ nulle indique l'indépendance des deux variables aléatoires. Un tableau détaillé des valeurs de γ , $\log P_o$ et ρ est fourni en annexe 5. Les valeurs de probabilités des tests F qui accompagnent l'analyse de régression individuelle sont toutes inférieures au seuil critique $\alpha = 0.01$. Les tests t associés à l'estimation des paramètres γ et $\log P_o$ sont également significatifs au seuil $\alpha = 0.01$. Seules 4 estimations ont été jugées non significatives (en gras, annexe 5). Les valeurs élevées du coefficient ρ confirment l'impression laissée par la figure 23. La fonction de puissance décrit de manière appropriée la relation entre P_f et l . L'analyse de régression indique que le modèle utilisé (fonction de puissance) interpole de manière satisfaisante les données. Les paramètres décrivant la relation entre P_f et l sont donc utilisés comme variables dépendantes pour l'analyse des facteurs « modalité », « mouvement » et « ordre ».

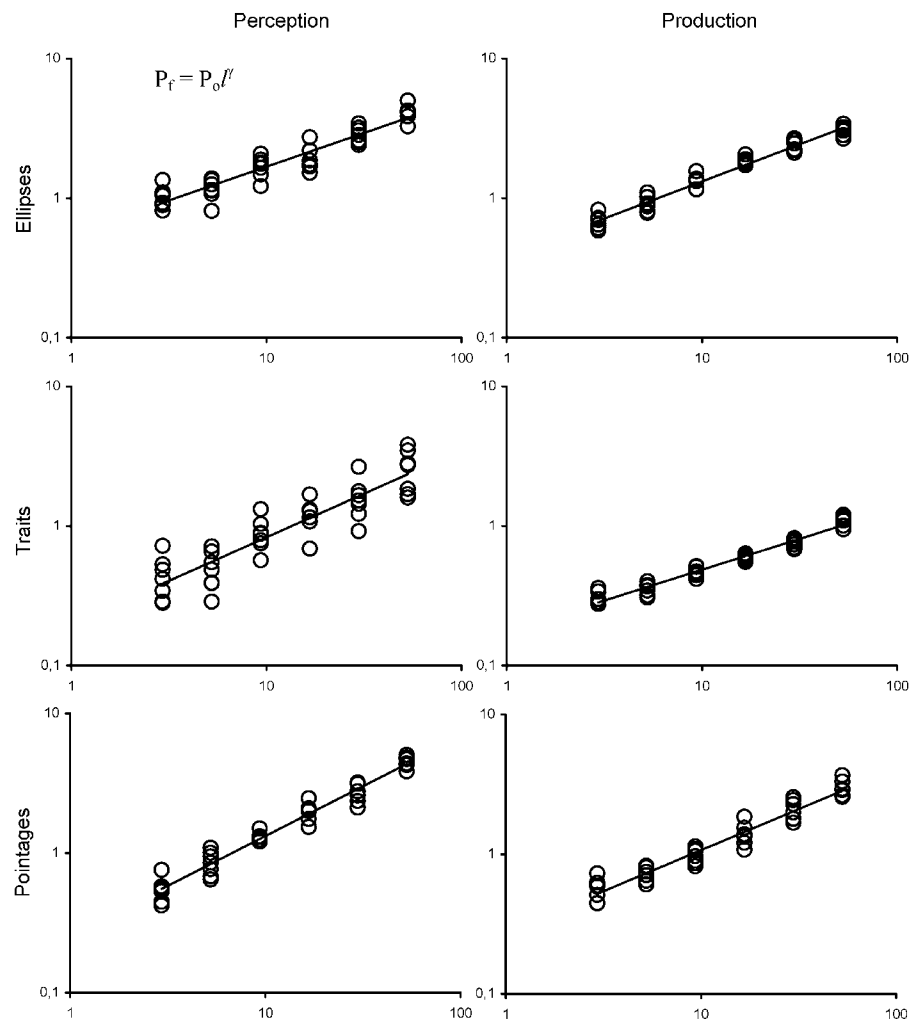


Figure 23. Résultats individuels, en perception et en production pour les trois types de mouvements testés. Les trois sujets présentés (de haut en bas) sont les trois premiers à être assignés à l'une des trois formes. Les ordres de passation correspondants sont (de haut en bas) ; pro, per et pro. Les axes logarithmiques indiquent en x la longueur de la trajectoire ($l_1 = 2.95 \text{ cm}$; $l_2 = 5.25 \text{ cm}$; $l_3 = 9.37 \text{ cm}$; $l_4 = 16.69 \text{ cm}$; $l_5 = 29.75 \text{ cm}$; $l_6 = 53.02 \text{ cm}$) et en y la période (P_f , ajustée ou exécutée). Dans chaque cas, les données peuvent être interpolées par une droite. La pente et l'ordonnée à l'origine de cette droite correspondent respectivement à l'exposant γ et au logarithme du facteur P_0 de la fonction de puissance ($P_f = P_0 l^\gamma$) utilisée pour décrire la relation entre P_f et l au niveau individuel. Le coefficient de corrélation (ρ) exprime la qualité de l'ajustement obtenu (voir texte). Les nuages de points sont visiblement moins dense en perception qu'en production. Ce phénomène est particulièrement évident pour le sujet 1 dans la condition trait. La perception est la première modalité testée chez ce sujet. La production correspondante est beaucoup plus régulière. Cette tendance est moins flagrante pour les 2 sujets ayant commencés par la production. Les paramètres (γ , $\log P_0$ et ρ) sont estimés dans les deux modalités pour les 42 participants. Les valeurs obtenues sont données en annexe 5. Les effets des facteurs « modalité », « mouvement » et « ordre » sont testés sur chacun des trois paramètres décrivant la relation entre P_f et l .

2.3 Analyse de variance des paramètres de la régression.

Dans cette section, nous testons au niveau du groupe, l'effet du type de mouvement, de la modalité et de l'ordre de passation sur les trois paramètres de la régression. Si la situation de perception implique une simulation motrice nous devrions observer une bonne correspondance des résultats entre les deux modalités. L'effet du type de mouvement, attendu en production (forme et difficulté), devrait être observé pour la perception. Les paramètres (γ , $\log P_o$ et ρ) sont analysés séparément dans trois plans mixtes ANOVA $2_{(\text{modalités})} * 3_{(\text{mouvements})} * 2_{(\text{ordres})}$. Les résultats des trois analyses sont développés successivement. Les valeurs des paramètres pour les situations de perception et production sont données dans la figure 24.

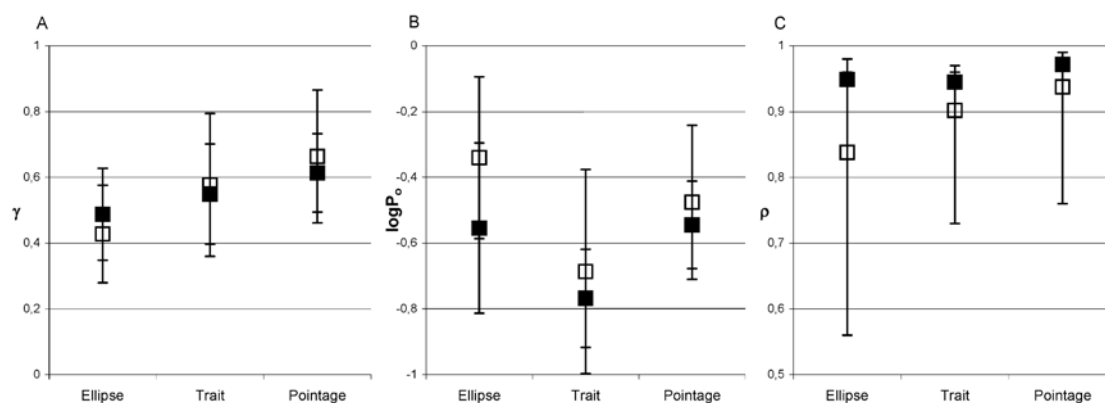


Figure 24. Paramètres de la régression pour la perception (carrés transparents) et la production (carrés noirs). Les barres d'erreurs indiquent la limite de l'écart type en A et B. En C les barres d'erreurs indiquent les minimums et maximums observés. A) La valeur de l'exposant γ est plus importante pour les mouvements de pointage que pour les dessins d'ellipse. Les simples traits occupent une position intermédiaire. B) La valeur du facteur de la régression de puissance ($\log P_o$) est plus importante pour la perception que pour la production. Le rythme du mouvement ($1/P_o$) est donc plus rapide pour les mouvements exécutés que pour les mouvements imaginés. C) La corrélation est plus forte pour les mouvements produits que pour les mouvements imaginés. En production, la variabilité du paramètre ρ est considérablement réduite par rapport à la situation de perception. Les minimums et maximums observés sont alors très proches de la valeur moyenne du coefficient de corrélation. Cette valeur moyenne est calculée sur les notes Z de Fisher puis transformée par la fonction inverse pour donner le coefficient de corrélation moyen.

Exposant γ : L'exposant γ représente le degré d'isochronie. Plus la valeur de γ est faible, plus le principe d'isochronie est influent, c'est-à-dire, moins le temps de mouvement est sensible à la longueur de la trajectoire du mouvement. Le test de Levene d'homogénéité des variances signale un problème d'hétérogénéité pour les deux modalités testées (perception : $F_{(5,36)} = 2.6$, $p < 0.05$ et production : $F_{(5,36)} = 2.78$, $p < 0.05$). Les transformations de données, classiquement utilisées (log et racine), sont inefficaces dans ce cas. Les distributions peuvent être reconstruites à partir de l'annexe 5. L'ANOVA est effectuée en dépit de cette déviation de ses conditions de validité. Le facteur mouvement influence significativement la valeur de l'exposant γ , ($F_{(2,36)} = 5.16$; $p < 0,05$). La valeur de γ est plus importante pour les mouvements de pointage que pour les dessins d'ellipses. La condition trait occupe une position intermédiaire. Les moyennes de γ correspondantes aux trois mouvements (ellipse, trait, pointage) sont respectivement de et 0.43 ; 0.58 et 0.66 dans la situation de perception et 0.48 ; 0.55 et 0.61 pour la situation de production (figure 24 A). Les effets principaux des autres facteurs ne sont pas significatifs. Aucun effet d'interaction n'est mis en évidence.

Facteur $\log P_0$: Ce facteur est estimé par l'ordonnée à l'origine de la droite de régression des valeurs de $\log P_0$ et $\log l$. La valeur transformée P_0 représente une période (en s). L'analyse de variance est conduite sur les valeurs log. Les tests de Levene d'homogénéité des variances sont non significatifs (perception : $F_{(5,36)} = 2.3$, $p > 0.05$ et production : $F_{(5,36)} = 1.77$, $p > 0.05$). Les résultats de l'ANOVA indiquent un effet principal du facteur mouvement ($F_{(2,36)} = 7.36$; $p < 0.01$). Les valeurs de P_0 associées aux moyennes de $\log P_0$ correspondantes aux trois mouvements (ellipse, trait, pointage) sont respectivement de 0.45 s ; 0.20 s et 0.33 s dans la situation de perception et 0.28 s ; 0.17 s et 0.28 s dans la situation de production (figure 24, B). Le rythme, ou tempo, du mouvement est donné par $1/P_0$. Exprimées en *bpm* ($60/P_0$), les valeurs du tempo (de 350 à 133 *bpm*) sont relativement élevées par rapport à ce qui est observé classiquement dans les recherches sur les tempos préférés et spontanés.

En perception comme en production, le tempo adopté par les sujets est particulièrement élevé dans la condition trait (faible valeur de P_0). Lorsque les contraintes de précision sont faibles, les tempos des mouvements rectilignes sont plus élevés. L'absence de cible ne permet pas le calcul de l'indice de difficulté ($ID = l/\emptyset$)

pour tester la tendance logarithmique décrite par Fitts. Mais la relation observée entre le tempo moyen et l'absence ou la présence de cible va dans le bon sens. Nous pensons que la différence de tempo entre les conditions pointage et trait illustre le principe décrit par Fitts.

Comme les moyennes présentées dans la figure 24 B le laissaient supposer, un effet principal du facteur modalité ($F_{(1,36)} = 13.29$; $p < 0.01$) est révélé par l'ANOVA. Le tempo des sujets est plus important dans les situations de production que dans les situations de perception.

L'analyse de variance indique également un effet d'interaction de l'ordre et de la modalité ($F_{(1,36)} = 4.53$; $p < 0.05$). La figure 25 A résume cette interaction. Les résultats obtenus en perception et en production semblent plus proches lorsque les sujets ont commencé l'expérience par la tâche de production. Pour les sujets commençant l'expérience par la tâche de perception les résultats obtenus dans les deux modalités sont sensiblement différents. Cet effet peut être interprété comme un amorçage, ou une imitation de la production, lors de la tâche de perception. Ce point de vue doit cependant être nuancé compte tenu de la différence de performance en production pour les deux groupes (figure 25 A). Les sujets terminant par l'épreuve de production ont un tempo particulièrement élevé (faible $\log P_0$). Les différences liées à l'ordre pour ce paramètre pourraient simplement refléter une volonté des sujets à terminer rapidement l'expérience.

Coefficient de corrélation ρ . Le coefficient de corrélation reflète la distribution des observations autour de la droite de régression qui résume la relation entre P_f et l . Lorsque $\rho = 1$, les paramètres γ et $\log P_0$ expliquent entièrement la relation observée entre les deux variables dépendantes. Les coefficients de corrélations ne se distribuent pas normalement. La transformation Z de Fisher est donc appliquée avant l'analyse. Les variances sont homogènes dans la situation de perception (Levene, $F_{(5,36)} = 2.08$, $p > 0.05$) mais pas dans la situation de production (Levene, $F_{(5,36)} = 2.85$, $p < 0.05$). Les résultats de l'ANOVA indiquent un effet principal du facteur mouvement ($F_{(2,36)} = 9.58$; $p < 0.01$) et du facteur modalité ($F_{(1,36)} = 65.43$; $p < 0.01$). L'effet de la modalité est particulièrement important puisqu'il représente près de 20 % de la variance observée. La corrélation moyenne est particulièrement élevée dans la condition pointage

(figure 24 C). Comme dans le cas du facteur $\log P_o$, l'analyse de variance indique également un effet d'interaction de l'ordre et de la modalité ($F_{(1,36)} = 9.78$; $p < 0.01$). La figure 25 B résume cette interaction. Les résultats obtenus en perception et en production semblent, une fois encore, beaucoup plus proches lorsque les sujets ont commencé l'expérience par la tâche de production.

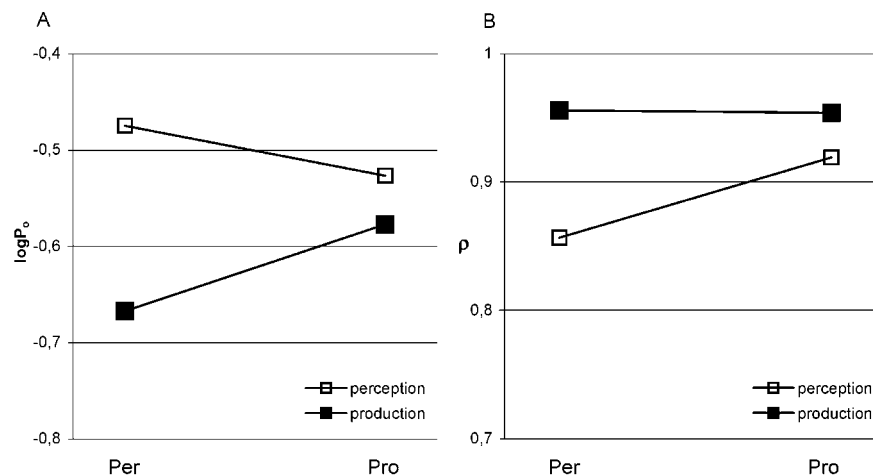


Figure 25. Effets d'interaction entre le facteur modalité (perception, production) et le facteur ordre (per, pro). Pour les sujets commençant l'expérience par la tâche de production (pro), les valeurs des paramètres $\log P_o$ (A) et ρ (B) obtenues dans les 2 modalités sont proches. Pour les sujets commençant l'expérience par la tâche de perception (per) les résultats obtenus dans les deux modalités sont relativement plus importants. Ces effets peuvent être interprétés comme un amorçage ou une imitation de la production vers la perception. Ce point de vue doit cependant être nuancé compte tenu de la différence de performances en production pour les deux groupes, en particulier pour le paramètre $\log P_o$. Les sujets terminant par l'épreuve de production ont un tempo élevé (faible $\log P_o$). Les différences liées à l'ordre pour ce paramètre pourraient simplement refléter une volonté des sujets à terminer rapidement l'expérience.

2.4 Corrélation entre perception et production

Les deux effets d'interactions suggèrent que l'ordre de passation des modalités pourrait favoriser une similarité des résultats obtenus en perception et en production. Toutefois, cet effet n'est pas présent pour l'exposant γ , et, dans l'analyse précédente, les données sont moyennées sur l'ensemble des participants. Nous avons vu également qu'une interprétation moins ambitieuse, basée sur l'idée que les sujets sont simplement pressés de terminer l'expérience, peut tout aussi bien expliquer les différences de tempos liées à l'ordre. Le but de cette analyse est de tester au niveau individuel l'idée selon laquelle la perception ressemble plus à la production lorsque les caractéristiques temporelles de l'exécution sont mesurées en premier. La figure 26 A et B résume le test de cette hypothèse pour les paramètres γ et $\log P_o$ respectivement.

La corrélation des paramètres de la régression de puissance semble plus importante lorsque les sujets commencent l'expérience par la tâche de production (figure 26 A) que lorsque les sujets commencent l'expérience par la tâche de perception (figure 26 B). Les analyses de régression indiquent pour le facteur γ : $y = 0.58x + 0.23$, $r = .75$ ($F_{(1,19)}=24.35$; $p < .01$) et $y = 0.41x + 0.31$, $r = .66$ ($F_{(1,19)}=14.59$; $p < .01$) respectivement pour les ordres « pro » (figure 26 A, triangles) et « per » (figure 26 B, triangles).

Pour le facteur $\log P_0$, les analyses de régression donnent : $y = 0.46x - 0.33$, $r = .73$ ($F_{(1,19)}=21.76$; $p < .01$) et $y = 0.47x - 0.44$, $r = .61$ ($F_{(1,19)}=11.34$; $p < .01$) respectivement pour les ordres « pro » (figure 26 A, cercles) et « per » (figure 26 B, cercles).

Ces résultats montrent 1) que les caractéristiques temporelles de la perception et de la production, figurées par les paramètres γ et $\log P_0$, ne sont pas indépendantes et 2) que la relation entre les deux modalités est sensiblement plus forte si les sujets commencent l'expérience par la tâche de production. La vérification statistique de cette dernière affirmation indique que les deux paires de coefficients de corrélations ne sont pas significativement différentes. Quoi qu'il en soit, les résultats indiquent que la perception et la production sont liées chez un même sujet.

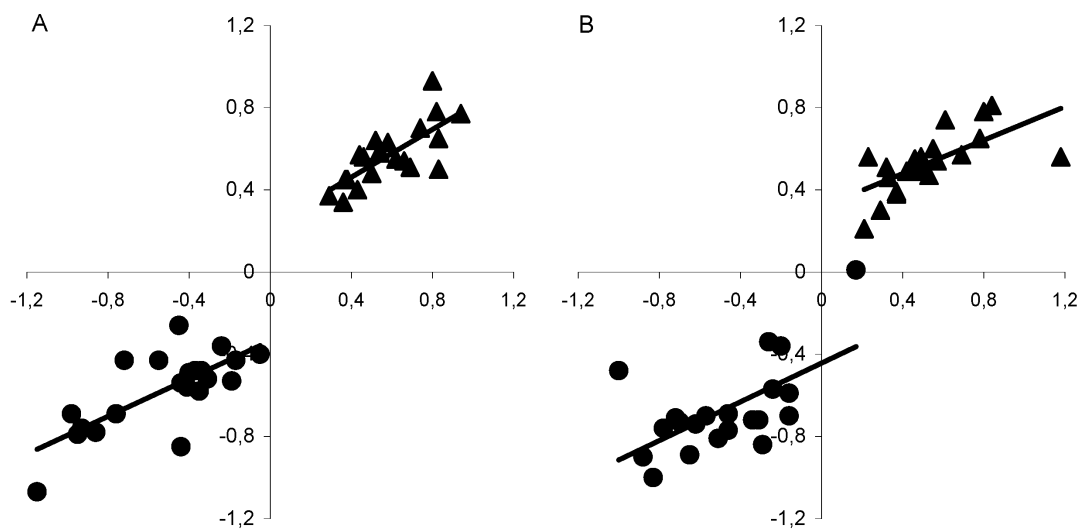


Figure 26. Corrélation des paramètres γ (triangles) et $\log P_0$ (cercles) pour le groupe de sujets ayant commencé par la production (A : Ordre Pro) et pour le groupe ayant commencé par la perception (B : Ordre Per). Chaque groupe comprend 21 sujets. L'axe des abscisses (x) donne les valeurs mesurées en perception et l'axe des ordonnées (y) les valeurs observées en production. Les analyses de régression suggèrent que la corrélation entre perception et production est meilleure lorsque la production est passée en premier (A). Toutefois, quel que soit l'ordre de passation, une corrélation significative est mesurée entre la modalité perception et la modalité production (voir texte).

3. DISCUSSION

La comparaison directe des caractéristiques temporelles des mouvements perçus et produits nous a permis de répondre à plusieurs questions concernant les rapports entre la préférence perceptive et la motricité.

1) La mesure de la préférence perceptive pour des mouvements d'amplitudes différentes révèle une modulation de la période par l'amplitude comparable à celle des mouvements réels (la comparaison des valeurs de l'exposant entre les deux modalités sont non-significatives).

2) Cette modulation dépend de la forme du mouvement et de la présence de la cible. En d'autres termes, les lois motrices déterminant la durée des différents types de mouvements (ellipse, trait, pointage) déterminent également les durées préférées.

3) La différence entre les mouvements rectilignes et les mouvements de pointage, en production comme en perception, suggère que la loi de Fitts influence les jugements perceptifs de vitesse. Toutefois, ce point mériterait une expérience particulière dans laquelle la taille de la cible serait variée pour permettre le calcul systématique de l'indice de difficulté.

4) Le tempo de la préférence perceptive est relativement plus lent que celui adopté pour la production de mouvements comparables (différence des valeurs de $\log P_o$).

5) Quel que soit l'ordre de passation, l'exposant γ et le facteur $\log P_o$ sont corrélés lorsque la perception et la production sont comparées pour la population testée (indépendamment du facteur tâche). Il existerait donc un lien, au niveau intra-individuel, entre la préférence perceptive et l'exécution.

6) Il pourrait y avoir un effet d'amorçage de la production vers la perception. Les interactions entre le facteur « modalité » et le facteur « ordre » observées pour les valeurs de $\log P_o$ et ρ , ainsi que la corrélation des paramètres de la régression semble plus importante lorsque les sujets commencent par la tâche de production. Ce dernier

argument est cependant discutable parce que la différence des deux paires de coefficients de corrélations n'est pas significative.

Dans cette expérience, seule la différence de tempo, et la corrélation plus forte en production de la période et de l'amplitude semblent séparer les mouvements produits et perçus. Quoiqu'il en soit, cette différence n'affaiblit pas la validité des observations. La relation entre l'amplitude et la durée des mouvements de pointage et de traçage est comparable en perception et en production. Les principes qui déterminent la production des mouvements de traçage et de pointage déterminent également la préférence perceptive des sujets. Les changements d'amplitude, de forme, et l'ajout d'une contrainte de précision s'accompagnent d'une modulation de la période préférée comme nous pouvions le supposer dans l'hypothèse d'une préférence basée sur une simulation motrice intériorisée.

Nous avons vu ci-dessus que dans cette expérience, seule la différence de tempo, et la corrélation plus forte en production de la période et de l'amplitude semblaient différencier les mouvements produits et perçus. Nous pouvons émettre une hypothèse sur la cause de la différence de tempo. Nous allons y revenir dans la prochaine expérience. Avant cela, nous voulons souligner que la présence de ces modulations témoigne du faible impact du choix des limites des valeurs de la période initiale. Dans les deux expériences précédentes, la proximité entre la moyenne des périodes préférées et la moyenne des valeurs de P_i échantillonnées résulte, simplement, du fait que la mesure était centrée sur le phénomène. Elle ne peut être attribuée à un phénomène de régression des choix vers la moyenne de la distribution des P_i .

X. VARIABILITE SPATIALE TOLEREE ET TRACES D'ELLIPSES

Dans le chapitre III, consacré aux tempos préférés en perception et en production, nous avons vu que les tempos spontanés et préférés étaient très proches, si ce n'est identiques. Nous avons également souligné, dans le chapitre IV.2, que les durées des mouvements imaginés étaient similaires aux durées des mouvements réels. On peut légitimement se demander pourquoi nous observons une différence entre les durées préférées et réelles dans l'expérience précédente ? La préférence perceptive serait-elle dépendante d'un processus spécifique qui pourrait expliquer cette différence ?

Nous pensons que l'explication pourrait être assez simple et nous allons avoir l'occasion de valider partiellement une hypothèse concernant cette différence. En effet, nous avons abordé le modèle « minimum variance » (Harris & Wolpert, 1998) et la question du bruit dans les ensembles neuronaux. Pour permettre un comportement moteur adapté, le système de contrôle doit optimiser le rapport entre la vitesse (durée) et la variabilité spatiale des mouvements du bras.

En perception, il n'est pas exclu que la variabilité spatiale des trajectoires présentées soit en relation directe avec les durées moyennes préférées par les sujets. En fait, nous pensons que la faible variabilité spatiale des stimuli (construits comme des modèles biologiques d'un point de vue dynamique mais trop parfait du point de vue de la forme) explique les durées importantes associées aux vitesses préférées des participants. Les périodes choisies par les sujets en perception seraient plus importantes que les périodes mesurées en production parce que les sujets simuleraient dans la première situation un mouvement spatialement plus contraint que les mouvements produits.

Pour appuyer cette supposition, il faudrait : 1) montrer que les durées d'exécution de mouvements ayant une variabilité spatiale comparable à celle du stimulus visuel sont équivalentes aux durées préférées pour ce stimulus et 2) montrer que les périodes préférées dépendent de la variabilité spatiale du stimulus présenté visuellement. Nous avons des données qui permettent de discuter partiellement le point 1. Il s'agit de l'étude d'un cas individuel dont les données ont été recueillies dans des conditions qui autorisent une bonne généralisation des résultats.

1. METHODE

Dans cette expérience, un sujet (30 ans) ayant une vue normale devait tracer des ellipses entre les limites d'un modèle composé de deux ellipses de tailles différentes superposées. La largeur de l'espace entre les deux ellipses composant les modèles (la marge) détermine la variabilité spatiale tolérée pour le mouvement et constitue la variable principale de cette expérience. L'objectif est de mesurer la durée minimale de traçage d'ellipses pour différentes conditions de taille et de variabilité spatiale tolérée.

1.1 Stimuli

Afin d'étudier le rapport entre la variabilité spatiale tolérée et la durée des mouvement de traçage nous avons croisé 7 ellipses de périmètres différents (4,9 ; 10,4 ; 14,6 ; 23,2 ; 30,8 ; 39,4 et 51 cm) et 7 marges (0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 1,2 ; 1,8 ; 2,7 et 4,3 cm). L'excentricité des ellipses est de 0,9. Les modèles présentés au sujet étaient, en fait, composés de deux ellipses dont les semi axes x différaient en fonction de la marge tolérée (le semi-axe x de l'ellipse supérieure - le semi-axe x de l'ellipse inférieure = marge). Les modèles sont construits de telle sorte que si une ellipse est inscrite entre les deux ellipses formant le modèle, sa longueur de trajectoire correspond aux longueurs données ci-dessus (figure 27). En d'autre terme, les ellipses modèles étaient centrées sur les ellipses de références, non dessinées. Pour certaines combinaisons de longueur de trajectoires et de marges (7 des 49 modèles construits), l'ellipse inférieure a en pratique un semi-axe x négatif. Dans ce cas cette limite est remplacée par un trait au centre de l'ellipse qui définit la limite supérieure (voir figure 27). Le sujet étant gaucher, les modèles sont orientés à -45° .

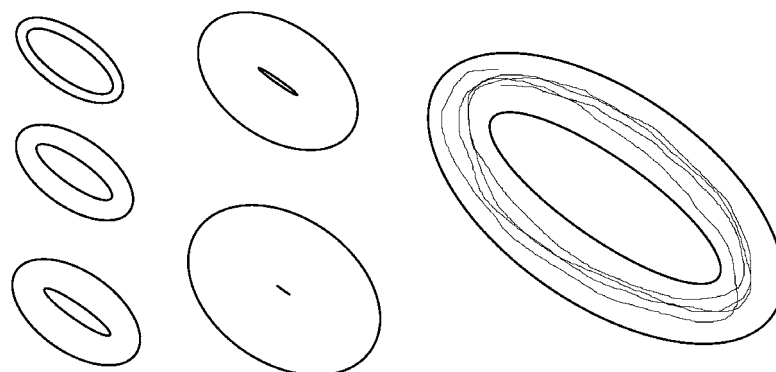


Figure 27. Exemple de modèles utilisés pour contrôler la variabilité spatiale des mouvements de traçage. Le sujet doit tracer des ellipses, en continu et le plus vite possible, sans sortir de l'intervalle entre les deux ellipses. Si une ellipse parfaite était tracée au centre des limites présentées, elle aurait un des 7 périmètres de référence utilisés dans cette expérience. Sur le modèle de droite un exemple de production est simulé.

1.2 Procédure

Le matériel d'enregistrement des mouvements est le même que dans l'expérience précédente (stylo et tablette graphique). Le stylo laisse une trace. Le sujet est informé que la tâche consiste à tracer, le plus vite possible, et en continu, des ellipses entre les deux ellipses dessinées sur la feuille. Il est précisé qu'il ne faut pas sortir des limites et qu'il doit, autant que possible compte tenu de la consigne de vitesse, tracer l'ellipse au centre des modèles. Les 49 modèles étaient présentés au sujet dans un ordre aléatoire. Deux séries sont exécutées par le sujet dans la même passation. Le modèle était placé sur la tablette et le sujet commençait le mouvement. Après quelques cycles, le déplacement du stylo était enregistré pendant 15 secondes à pleine vitesse. L'essai était recommencé si le sujet n'était pas assez précis.

2. RESULTATS.

L'analyse de la cinématique des mouvements est réalisée de la même manière que dans l'expérience précédente. Seule différence, les périodes de plusieurs cycles sont moyennées. Par ailleurs, nous n'avons pas sélectionné l'essai ayant la trajectoire la plus proche de la longueur de référence de l'ellipse. Les données des deux sessions étaient également moyennées. Avec la méthode des modèles, les longueurs des trajectoires des ellipses tracées par le sujet deviennent quasiment identiques aux longueurs des ellipses de référence lorsque la marge est faible. Pour les marges les plus importantes la longueur des trajectoires produites restent toutefois proches des longueurs attendues. Les résultats sont présentés en fonction des paramètres longueur (l) et marge.

Les durées moyennes d'un cycle d'un mouvement de traçage d'ellipse en fonction de la variabilité spatiale tolérée et de la longueur de la trajectoire apparaissent sur la figure 28. Les marques blanches indiquent des durées minimales, dont la valeur varie faiblement (entre 0.204 et 0.255 s). Les marques noires représentent les valeurs pour lesquelles une influence de la longueur de la trajectoire et/ou une influence de la marge est supposée (> 0.32 s).

Lorsque la variabilité spatiale tolérée est grande (marge de 4,3 cm), le sujet peut augmenter la vitesse moyenne du mouvement quasiment proportionnellement à la longueur de la trajectoire. La vitesse moyenne maximum atteinte par le sujet est de 102

cm/s ($l = 51$ cm ; marge = 4,3 cm). Lorsque la variabilité spatiale tolérée est faible (marge de 0,2 cm), la vitesse moyenne est en revanche constante (recopiage à 4 cm/s). Dans ce dernier cas le temps de mouvement augmente linéairement avec la longueur de la trajectoire. Entre ces deux extrêmes, la longueur de la trajectoire interagit avec la marge.

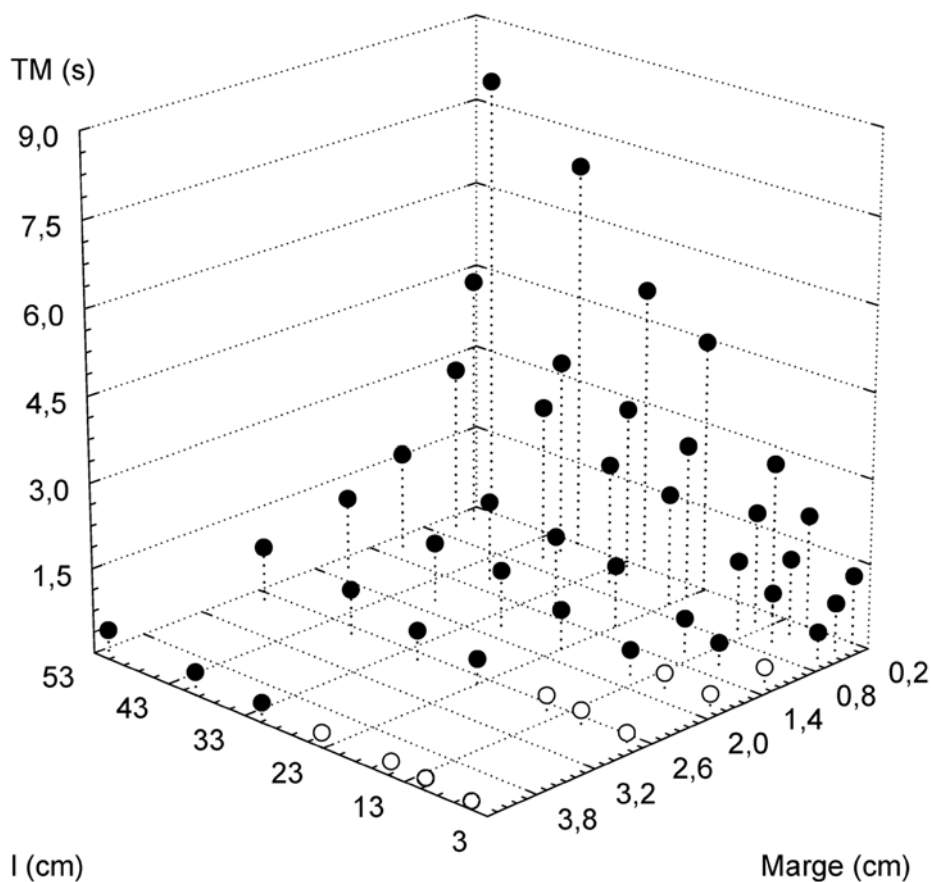


Figure 28. Durée moyenne d'un cycle d'un mouvement de traçage d'ellipse en fonction de la variabilité spatiale tolérée et de la longueur de la trajectoire. Le sujet doit tracer des ellipses en continu et le plus vite possible. Les points blancs indiquent des durées minimales, qui ne semblent pas dépendre de la longueur de la trajectoire (entre 0.204 et 0.255 s). Les valeurs représentées par un point noir sont toutes supérieures à 0.32 s. Lorsque la variabilité spatiale tolérée est grande (marge de 4,3 cm), le sujet augmente la vitesse moyenne du mouvement quasiment proportionnellement à la longueur de la trajectoire. Lorsque la variabilité spatiale tolérée est faible (marge de 0,2 cm), la vitesse moyenne est, en revanche, constante (recopiage) et le temps de mouvement augmente linéairement avec la longueur de la trajectoire. Entre ces deux extrêmes la longueur interagit avec la marge (voir texte).

Nous avons calculé un indice de difficulté ($ID = \text{Marge}/l$) pour résumer la relation du temps et de la difficulté du mouvement. Cette tendance est linéaire ($TM = 0,035ID + 0,22$; $r^2 = 0,99$).

Le plus intéressant pour notre sujet concerne les durées de production d'une ellipse pour les marges de 0,4 et 0,6 cm. Ces données nous intéressent particulièrement parce que la taille du point présenté sur l'écran dans les expériences précédentes est précisément comprise dans ces limites ($\varnothing = 0.5 \text{ cm}$). La figure 29 nous permet de supposer que le temps de mouvement moyen pour le traçage d'une ellipse de 30 cm de longueur, à un rythme spontané mais dont la variabilité spatiale serait implicitement maintenue dans ces limites par le sujet (0.4 ; 0.6 cm), serait compris entre 2,2 et 3,09 s. Il faut remarquer que la valeur de l'exposant des régressions de puissance est plus élevée que celle obtenue pour les mouvements réalisés à un rythme spontané ($\gamma = 0.48$).

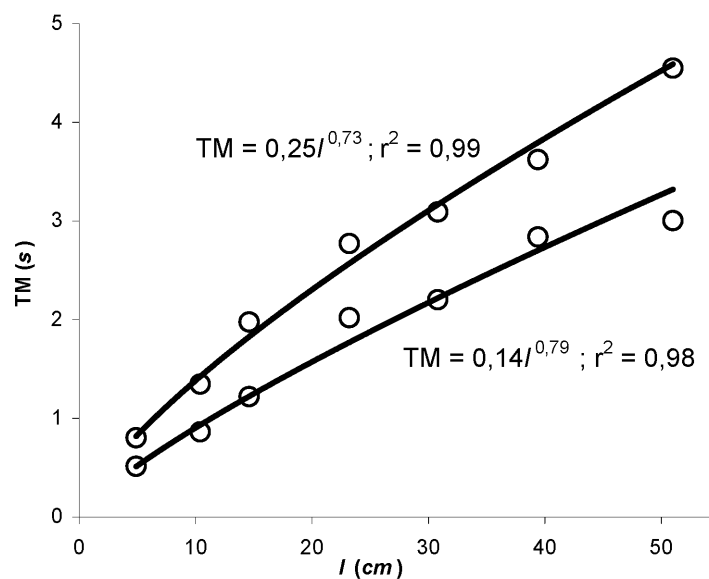


Figure 29. Représentation de l'effet de la longueur de la trajectoire sur le temps de mouvement lorsque la variabilité est de 0,4 cm (courbe du haut) et de 0,6 cm. Les temps de mouvements limites pour une ellipse de 30,8 cm ayant une variabilité spatiale réduite sont respectivement de 3,09 et 2,2 s. Il est notable que la valeur de l'exposant de la régression de puissance est plus élevée que celle mesurée dans l'expérience précédente ($\gamma = 0.48$).

3. DISCUSSION

Dans cette expérience, nous avons mesuré les temps de traçage dans des situations où la variabilité spatiale tolérée de la trajectoire est contrôlée. Le but de la mesure était de montrer que les durées d'exécution de mouvements ayant une variabilité spatiale comparable à celle du stimulus visuel sont comparable aux durées préférées. Bien que cela soit discutable, la variabilité spatiale du point sur l'écran a été assimilée à son diamètre. De plus, un seul sujet participe à cette étude. Toutefois, nous pensons que la consigne de vitesse maximale garanti que les données recueillies sont représentatives des capacités du système moteur.

Les périodes des mouvements mesurées dans cette expérience sont comparables aux périodes moyennes préférées par les sujets dans la situation de perception de l'expérience précédente. Nous pensons que la faible variabilité spatiale des stimuli en perception pourrait expliquer les durées importantes associées aux vitesses préférées des participants. La bonne correspondance des durées préférées et simulées dépendrait de la variabilité spatiale attribuée au mouvement dans les deux modalités.

Pour comprendre ce dernier point, il faut se placer dans une situation de mouvement imaginé, dont nous avons vu qu'elle ne produisait pas de résultats sensiblement différents de la situation de vitesse préférée. Dans le cas des mouvements imaginés, le processus de simulation dans lequel s'engage le sujet possède toutes les caractéristiques des mouvements du sujet lui même, y compris le contrôle de leur variabilité spatiale. Dans la situation de perception que nous utilisons, la faible variabilité de la trajectoire du point sur l'écran encouragerait les sujets à simuler un mouvement dont la variabilité spatiale serait plus contrainte que la variabilité de leur mouvements réels dans la situation de traçage à vitesse spontanée.

Cette différence de planification des mouvements réels et simulés se traduirait par des temps de mouvements plus importants dans la tâche de perception que dans la tâche de production. Dans les situations classiques de mouvements imaginés, les temps simulés et exécutés seraient précisément identiques parce que leur variabilité spatiale serait similaire. Dans la situation de perception que nous utilisons, la variabilité spatiale de la trajectoire présentée serait un aspect déterminant la préférence perceptive.

Un certain nombre de points concernant les résultats présentés mériteraient d'être développés. En ce qui concerne les valeurs élevées de l'exposant mesuré dans cette expérience, nous pensons que la consigne de vitesse ne nous place pas dans une situation d'isochronie (qui doit être restreinte aux mouvements exécutés sans contraintes temporelles). Autre point de discussion, nous savons que la variabilité

spatiale des mouvements de traçage d'ellipse n'est pas constante le long de la trajectoire (Viviani & Schneider, 1991). Ce point mériterait d'être pris en compte dans une étude plus sérieuse de l'interaction de la variabilité spatiale, de la longueur de la trajectoire et du temps. Bien que cela soit possible, nous n'avons pas calculé les valeurs de l'exposant β dans ces situations. Il est tentant de supposer que des altérations de la loi de puissance $2/3$ se produisent lorsque la marge impose un recopiage ou encore, lorsque les mouvements sont très rapides. Dans leur ensemble, ces résultats pourraient être mis en correspondance avec un certain nombre de travaux sur le contrôle des mouvements rapides (Plamondon, 1992).

Pour étudier plus directement l'impact de la variabilité spatiale tolérée sur la formation de la préférence perceptive, il nous faudrait maintenant démontrer que les périodes préférées dépendent de la variabilité spatiale du stimulus présenté visuellement. Quoiqu'il en soit, nous pouvons affirmer que les résultats centraux de l'expérience précédente : la période préférée des sujets est, tout comme les temps de mouvements exécutés, modulée par l'amplitude, la forme et le type de mouvements présenté. Autrement dits, les principes qui déterminent les durées relatives des mouvements produits déterminent également la durée préférée des mouvements perçus. Comme le suggère la relation observée, au niveau individuel, entre la perception et la production, cette correspondance serait d'ailleurs le reflet de la contribution de la motricité du sujet à la formation du jugement perceptif de « préférence ». Nous pensons que le processus de simulation motrice intériorisée, proposé par Jeannerod, (2001), permettrait d'expliquer la présence de principes moteurs dans la situation de perception.

Ces principes moteurs peuvent être envisagés comme un ensemble de connaissances implicites concernant notre propre motricité (Viviani, 2002). Nous pouvons supposer que ces connaissances implicites, en parties innées, seraient développées au cours de l'ontogenèse par l'exercice de la motricité, c'est-à-dire par l'apprentissage. L'enfant, en apprenant à contrôler ses mouvements, développerait des modèles internes impliqués dans une boucle sensori-motrice ayant pour fonction d'assurer la planification et le contrôle des actions (Wolpert & Ghahramani, 2000).

Dans la situation de perception, une simulation motrice intériorisée conduirait à l'actualisation de connaissances motrices implicites qui détermineraient, finalement, la période finale préférée. Dans la perspective développementale évoquée plus haut, nous pouvons faire l'hypothèse que la préférence perceptive dépendra, fondamentalement du niveau des compétences motrices des enfants. Nous allons tester cette hypothèse dans l'expérience suivante.

XI. PREFERENCE PERCEPTIVE ET DEVELOPPEMENT

Dans cette expérience, nous allons aborder la question du développement des préférences perceptives. Nous avons vu que l'ajustement de la vitesse moyenne du mouvement biologique d'un point mobile reflète l'influence, en perception, des principes déterminant la vitesse d'exécution des mouvements humains. Dans la situation de perception, une simulation motrice conduirait à l'actualisation de connaissances motrices implicites qui détermineraient, finalement, la période choisie. Si la préférence perceptive dépend d'une simulation motrice intériorisée, nous pouvons faire l'hypothèse que la préférence perceptive dépendra fondamentalement du niveau des compétences motrices des enfants. Les principes réglant la motricité des enfants devraient également déterminer leur préférences.

Nous avons vu précédemment qu'un principe de co-variation entre l'amplitude et la durée des mouvements perçus, assimilable au principe d'isochronie, était manifeste dans le cas de l'ellipse. Dans cette expérience, nous allons vérifier si ce principe d'isochronie est valable, en perception, chez des enfants âgés de 7, 9 et 11 ans. Seule la préférence perceptive est mesurée car plusieurs études ont déjà montré la validité du principe d'isochronie chez les jeunes enfants dans le cas des mouvements de traçage de cercle et d'ellipse (Vinter & Mounoud, 1991 ; Viviani & Schneider, 1991). Ces travaux indiquent qu'une tendance à l'isochronie est d'ores et déjà en place à l'âge de 5 ans.

Nous avons vu, dans le chapitre consacré aux tempos moteur spontané et préférés, que la valeur moyenne de l'intervalle inter-tapes est estimée à 0,5 s pour les enfants de 8 ans et 0,6 s pour les enfants de 10 ans (Drake et al., 2000). Ces mêmes travaux montrent également que la variabilité inter-individuelle en matière de tempo serait réduite durant l'enfance. A l'âge de 4 ans l'IIT oscille entre 0.35 et 0.45 s alors que chez des enfants de 10 ans des valeurs de 0.3 à 1 s sont observées. La variabilité inter-individuelle augmente à l'adolescence et serait maximale à l'âge adulte (Fraisse, 1974 ; Drake et al., 2000). Dans les expériences précédentes nous avons souvent implicitement assimilés la valeur du paramètre $\log P_0$ (l'ordonnée à l'origine de la régression de puissance des valeurs de P_f et I), qui représente un tempo, au tempo moteur spontané ou au tempo préféré. Si cette assimilation est justifiée, la variabilité inter-individuelle de la valeur du facteur $\log P_0$ devrait augmenter avec l'âge dans cette nouvelle expérience.

1. METHODE

Dans l'expérience qui suit, nous avons mesuré la relation entre P_f et l chez des sujets âgés de 7, 9 et 11 ans. Cette expérience reprend pour l'essentiel le matériel et la procédure de l'expérience « Préférence perceptive et principes moteurs ». Les résultats obtenus, en perception, chez les adultes participant d'abord à la phase de perception, dans la condition « ellipse » ($n = 7$), servent de contrôle.

1.1 Sujets.

Les enfants ($n = 45$) sont répartis en trois groupes en fonction de l'âge (Groupe 1, 7 ans ; G_2 , 9 ans ; G_3 , 11 ans). Pour chaque groupe, l'âge variait de ± 5 mois. La proportion de jeunes filles dans les groupes variait de 50 % à 62 %. Tous les sujets avaient une vue normale ou corrigée vers la normale.

1.2 Stimuli

Les stimuli utilisés pour la tâche de perception sont les mêmes que ceux utilisés dans l'expérience « Préférence perceptive et principes moteurs ». La présentation se fait avec un matériel identique. La valeur de la période initiale (P_i) de présentation est également tirée au hasard dans un intervalle compris entre 0.1 et 5.1 s. L'incrément temporel est, cette fois, fixé à 0.05 s. Ce changement permet au sujet d'accéder plus rapidement à la vitesse qu'il préfère lorsqu'il actionne les touches qui permettent de moduler la vitesse moyenne du stimulus.

1.3 Procédure

L'expérimentation avait lieu dans l'établissement de scolarisation des enfants. Les enfants étaient assis face à l'écran à une distance d'environ 60 cm. Chaque sujet participait à une seule session expérimentale dans laquelle les 6 longueurs de trajectoires ($l_1 = 2.95$ cm ; $l_2 = 5.25$ cm ; $l_3 = 9.37$ cm ; $l_4 = 16.69$ cm ; $l_5 = 29.75$ cm ; $l_6 = 53.02$ cm) étaient présentées 7 fois, par blocs. L'ordre de présentation des longueurs était aléatoire au sein de chaque bloc. Chaque participant ajustait donc la période finale (P_f) du mouvement pour 42 stimuli (6 longueurs * 7 blocs)

Les instructions précisait que le point sur l'écran représentait « la pointe d'un stylo tenu par une personne qui fait des dessins ». La consigne demandait aux enfants de « régler la vitesse du point pour qu'elle soit naturelle ». Il était parfois ajouté, pour les plus jeunes enfants, « règle la vitesse pour que ce soit agréable, choisis celle qui te plaît le plus ». Après l'ajustement l'enfant devait appuyer sur entrée pour valider son choix. Après une pause de durée variable le point apparaissait de nouveau sur l'écran avec une nouvelle période P_i et l'enfant devait reprendre la procédure d'ajustement. A l'issue des mesures, les enfants étaient raccompagnés et remerciés pour leur participation.

2. RESULTATS

L'analyse suit les mêmes étapes que celles des expériences précédentes. Les 7 périodes finales ajustées (P_f) pour chaque longueur de trajectoires sont d'abord moyennées. Les valeurs de P_f situées à $\pm 1.96 \sigma$ sont éliminées. Il n'est fait aucun cas du phénomène de capture. Le nombre de valeurs de P_f restantes par sujets est compté ($n \geq 40$ pour plus de 75 % de la population).

Comme dans l'expérience « Préférence perceptive et principes moteurs », la relation de P_f et l est décrite pour chaque sujet par une fonction de puissance ($P_f = P_o l^\gamma$). Les paramètres (γ , $\log P_o$ et ρ) sont estimés par une régression linéaire des valeurs $\log P_f$ et $\log l$. L'exposant γ représente l'influence de la longueur de la trajectoire sur la période. Plus il est proche de 0 plus le principe d'isochronie est prégnant. Le facteur P_o représente une période (en s) propre à chaque sujet et théoriquement constante pour l'ensemble des essais. Cette période peut être exprimée sous la forme d'un tempo ($1/P_o$ ou, en bpm, $60/P_o$). Finalement, la valeur du coefficient de corrélation ρ ($0 \leq \rho \leq 1$) est un indicateur de la dispersion du nuage de point autour de la droite de régression. Une valeur de ρ nulle indique l'indépendance des deux variables aléatoires. La corrélation est calculée sur les 42 valeurs individuelles. Un tableau détaillé des valeurs de (γ , $\log P_o$ et ρ) est donnée en annexe 6. L'estimation statistique des paramètres de la régression indique que, pour 2 des 15 enfants de 7 ans, la corrélation n'est pas significative (la période et la longueur ne sont pas liées par une loi de puissance). Hormis ces exceptions, toutes les régressions sont significatives au seuil $\alpha = 0.05$ (comme dans le cas de l'adulte).

La figure 30 A présente les valeurs moyennes des paramètres de la régression de puissance, en fonction de l'âge, observés dans cette expérience. Les résultats d'une expérience de Viviani et Schneider, (1991, pp 207) sont reproduits (seules les classes d'âge correspondantes à celles examinées dans notre étude sont représentées). Compte tenu des similarités entre les deux méthodes utilisées dans ces expériences, les caractéristiques de l'isochronie mesurées dans ces deux études sont comparés.

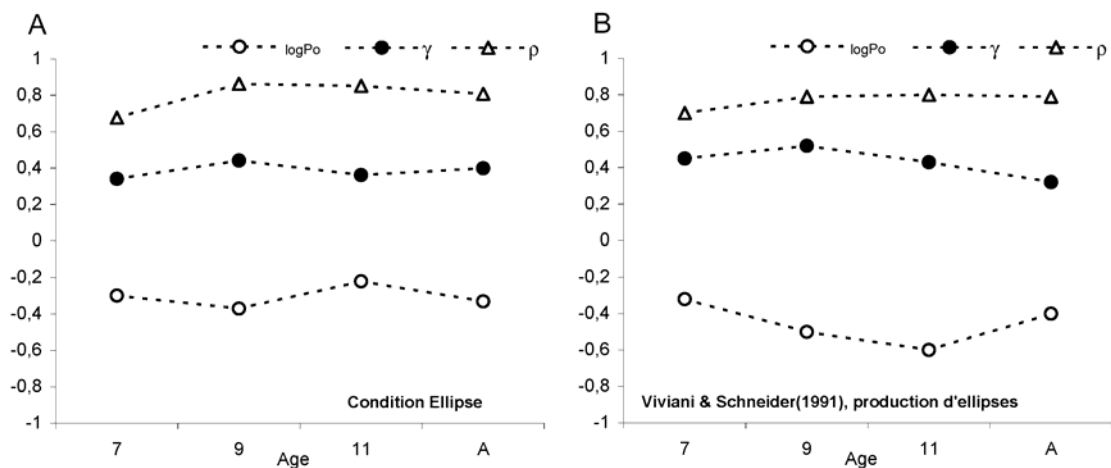


Figure 30. Moyenne des paramètres de la régression de P_f et l , pour la perception d'ellipses (A). La valeur moyenne des coefficients de corrélation est calculée sur les notes Z de Fisher puis transformée par la fonction inverse pour donner le coefficient de corrélation moyen. La corrélation moyenne est plus faible pour les plus jeunes enfants (7 ans). Aucune différence n'apparaît pour l'exposant γ et le tempo $\log P_0$. En B, nous avons rapportés les résultats de l'expérience de Viviani & Schneider (1991). Notre expérience reprend les mêmes tailles de stimuli et les mêmes groupes d'âge. Les résultats concernant l'exposant γ et le coefficient de corrélation sont quasiment identiques. En revanche, le rythme du mouvement ($1/P_0$) semble plus élevé, en production, chez les enfants de 9 et 11 ans (faible valeur de $\log P_0$).

L'effet de l'âge sur les caractéristiques de la covariation entre P_f et l , en perception, est testé sur les trois paramètres mesurés, pris individuellement.

Coefficient de corrélation ρ . L'analyse statistique révèle un effet principal de l'âge ($F_{(2,42)} = 8,66$; $p > 0.01$). La corrélation est moins forte pour les enfants du groupe de 7 ans (0.67) que pour les enfants de 9 et 11 ans (0.86 ; 0.85). Le coefficient de corrélation moyen est de 0.8 chez l'adulte. Ce résultat indique que la variabilité intra-individuelle des enfants de 7 ans est plus importante que celle des enfants de 9 et 11 ans. Une

corrélation plus faible pour les enfants de 7 ans apparaît également dans les résultats de Viviani et Schneider, (1991).

Facteur $\log P_o$. L'analyse statistique ne révèle pas d'effet de l'âge sur la valeur du facteur $\log P_o$. Lorsque l'on compare les résultats de notre étude à ceux de Viviani et Schneider (1991), il apparaît que les valeurs de $\log P_o$ semblent plus élevées, en perception, pour les enfants âgés de 9 et 11 ans. Le tempo (exprimé en *bpm*) serait plus important en production qu'en perception pour ces sujets.

Nous voulions vérifier si le tempo des sujets, estimé par l'ordonnée à l'origine de la régression de puissance (en s) et exprimé en *bpm*, pouvait être assimilé au tempo préféré. Dans ce cas, la variabilité inter-individuelle de cette période, exprimée comme un pourcentage, devrait augmenter avec l'âge. Les résultats donnent G_7 : 133 *bpm*, 40 % ; G_9 : 144 *bpm*, 62 % ; G_{11} : 95 *bpm*, 46 %. La variabilité inter-individuelle des tempos n'est pas plus importante pour les enfants de 11 ans que pour ceux de 7 ans. En revanche les sujets âgés de 9 ans semblent plus différents, en terme de tempo, que les enfants des deux autres classes d'âge. Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, nous n'observons pas d'effet graduel de l'âge sur la variabilité inter-individuelle des tempos.

Exposant γ . Nous n'observons pas d'effet de l'âge sur la valeur moyenne de l'exposant. L'analyse de la variabilité de ce paramètre ne révèle pas non plus d'effet de l'âge (si l'on exclus les deux sujets du groupe âgé de 7 ans pour lesquels la relation entre P_f et l est non-significative). La valeur du coefficient de variation exprimée en pourcentage est de 27 %.

3. DISCUSSION

Dans cette expérience nous avons mesuré la relation entre la période préférée et la longueur de la trajectoire, pour le mouvement d'un point ayant une trajectoire elliptique, chez des sujets âgés de 7, 9 et 11 ans. Les résultats d'une expérience examinant les caractéristiques spatiales et temporelles des mouvements de traçage d'ellipse chez des enfants d'âges équivalents (Viviani et Schneider, 1991) sont utilisés pour comparer la perception et la production de ce type de mouvement. Les résultats obtenu chez l'adulte sont également utilisés comme contrôle.

Les résultats indiquent que la tendance à l'isochronie, en perception, est déjà en place chez les enfants de 7 ans. L'absence de corrélation entre P_f et l chez deux des 15 enfants de ce groupe est attribuable à l'importante variabilité entre les différentes sessions. En moyenne, la corrélation de P_f et l est plus faible pour le groupe des 7 ans.

Nous avons vu dans la partie consacrée aux tempos moteurs spontanés et préférés que la valeur moyenne de l'intervalle inter-tapes est estimée à 0.4 s pour les enfants de 4 ans, 0,5 s pour les enfants de 8 ans et 0,6 s pour les enfants de 10 ans. Dans cette tâche de perception, et estimé par la méthode de régression, le tempo moyen reste, en moyenne, entre 100 et 140 *bpm* (0.6 s – 0.42 s d'intervalle inter-cycle). Finalement, concernant la variabilité inter-individuelle, les coefficients de variation des tempos exprimés en *bpm* suggèrent une relative stabilité avec l'âge contrairement à la progressive individuation observée lors de l'étude des tempo spontanés et préférés (Fraisse, 1974 ; Drake et al, 2000).

L'absence d'effet de l'âge sur la valeur de l'exposant γ est cohérente avec les résultats de Viviani et Schneider, (1991). Ces travaux indiquaient, pour des traçages d'ellipses, que la tendance à l'isochronie ne montrait aucune discontinuité notable entre 5 et 12 ans. La valeur de l'exposant restait comprise entre 0.4 et 0.5. Les résultats de cette expérience conduisent à la même conclusion.

A l'issue de cette expérience, nous constatons que l'ajustement de la vitesse moyenne du mouvement biologique d'un point mobile reflète l'influence, en perception, des principes déterminant la vitesse d'exécution des mouvements humains, pour les enfants de 7, 9 et 11 ans. Toutefois dans cette expérience, la relation entre perception et

production n'est testée qu'indirectement au niveau, général, du principe d'isochronie. Il serait intéressant de vérifier si la préférence perceptive montre la même sélectivité à la forme du mouvement et à la présence d'une cible que les adultes. Nous pourrions ainsi vérifier si le développement de la préférence perceptive se fait en parallèle du développement des capacités de contrôle moteur. La mesure de la production et de la perception des trois types de mouvements utilisés dans l'expérience « préférence perceptive et principes moteurs » serait nécessaire pour examiner le parallélisme de ce développement.

Il est possible de mesurer, plus directement, le degré de correspondance entre la préférence perceptive et la motricité. En effet, l'examen de sujets atteints de neuro-pathologies à dominante motrice devrait permettre, chez un même sujet, de vérifier l'existence de liens centraux entre perception et motricité. Dans l'expérience suivante, nous présentons les résultats, préliminaires, d'une étude de la relation entre les caractéristiques temporelles des mouvements perçus et produits chez des patients atteints de la maladie de Parkinson. Nous allons voir que ce modèle est particulièrement approprié pour étudier ces liens que nous supposons entre la préférence perceptive et la motricité.

XII. PREFERENCE PERCEPTIVE ET MALADIE DE PARKINSON

Les résultats présentés jusqu'ici suggèrent que l'identification des mouvements humains ne dépend pas uniquement d'un apprentissage visuel mais également des compétences motrices du sujets. La maladie de Parkinson, pourrait donc constituer un modèle pour l'analyse des relations entre motricité et perception, non seulement, parce qu'il s'agit d'un syndrome clinique dominé par des troubles du mouvement d'origine centrale, mais aussi parce que ces patients sont sensibles à des traitements pharmacologiques et chirurgicaux. En effet, dans la mesure où « l'état moteur » du sujet peut être modulé par ces traitements nous pouvons tester la préférence perceptive des sujets pour différents niveaux de compétence motrice. L'étude comparée de la perception et de la production chez ce type de patients permet donc de tester l'existence de liaisons fonctionnelles entre la perception et l'action au niveau individuel. En effet, nous avons vu, dans le chapitre IV.1.4, que l'étude de cas clinique pouvait permettre de comparer l'effet des lésions pariétales et frontales sur le degré de correspondance entre la durée des mouvements imaginés et réalisés. De même, l'étude comparée de la préférence perceptive et de la motricité chez ce type de patients devrait permettre de préciser les conséquences de la maladie de Parkinson, en terme de relations entre perception et action.

Plusieurs expériences ont été réalisées, en collaboration avec l'unité INSERM U 318 (troubles du mouvement). Nous ne présenterons ici que les résultats concernant la préférence perceptive et les principes moteurs. Ces derniers travaux sont les moins avancés et les résultats présentés s'apparentent plus à une étude de cas individuels qu'à une étude au niveau de la population. Nous préférons, cependant, présenter ces travaux parce qu'ils ont un lien direct avec la question centrale de notre travail : la motricité détermine-elle la préférence perceptive ?

1. LA MALADIE DE PARKINSON : UN MODELE POUR L'ETUDE DES RELATIONS PERCEPTION/ACTION

Avant de présenter la méthode et des résultats préliminaires de cette étude en cours, nous allons donner une brève description des troubles moteurs qui caractérisent la maladie de Parkinson. Si la cause de cette maladie reste difficile à déterminer (facteurs génétiques, influence d'une toxine inconnue), la cause des symptômes moteurs est, en revanche, plus nettement identifiée. Nous aborderons rapidement cet aspect et nous verrons que le lien de la dégénérescence du système dopaminergique nigro-strié aux manifestations cliniques n'est pas direct : les troubles moteurs de la maladie de Parkinson sont la conséquence du déséquilibre d'un système complexe, celui des ganglions de la base. Nous verrons également que de nouvelles perspectives thérapeutiques visent directement à rétablir un équilibre dans ce système. Finalement, les travaux portant sur la vision, la production d'intervalles temporels et les mouvements imaginés par ce type de patients seront abordés.

1.1 Aspects cliniques : les troubles moteurs des membres supérieurs

La maladie de Parkinson est un syndrome clinique, dominé par des troubles du mouvement qui consistent : en un tremblement de repos, une rigidité, et une akinésie. Le terme akinésie se rapporte souvent à l'akinésie en elle-même (perte de mouvement), la bradykinésie (ralentissement du mouvement), et l'hypokinésie (diminution de l'amplitude des mouvements). Plus généralement, c'est la capacité des patients à programmer les forces musculaires qui est atteinte. Cette perte de contrôle de la force se manifeste par des temps de réaction plus importants, et des profils de vitesse plus irréguliers (Stelmach & Castiello, 1992). La planification des mouvements est également atteinte car une nette détérioration des performances est observée lorsque la complexité de la tâche augmente, par exemple, lorsque le mouvement se compose de plusieurs séquences (Berardelli, Accornero, Argenta, Meco, & Manfredi, 1986).

Les travaux de Müller et Stelmach, (1992) sur les mouvements de préhension de patients atteints de la maladie de Parkinson indiquent que les différentes composantes des mouvements de saisie sont atteintes (composantes de transport et de manipulation, Jeannerod, 1984). L'effet est particulièrement marqué si une consigne de vitesse est donnée (durées plus longues, proportion de temps prise par l'accélération plus faible, vitesse à l'approche de l'objet moins élevée, marge de sécurité de l'ouverture de la pince réduite). Les auteurs concluent que l'intégration sensori-motrice est perturbée chez les patients atteints de la maladie de Parkinson. Il existe de nombreuses études des caractéristiques de l'exécution des mouvements chez les patients atteints de la maladie de Parkinson. Les mouvements de traçage, d'écriture et de pointage sont touchés par la maladie. Il est admis que les mouvements du bras des patients atteints de la maladie de Parkinson ont une vitesse moyenne réduite.

1.2 Origine neurophysiologique des troubles moteurs

Les troubles du mouvement qui dominent le tableau clinique de la maladie de Parkinson, résultent directement et indirectement d'une perte sélective des cellules neuronales au niveau d'un noyau du télencéphale : la substance noire *pars compacta* (SNc). L'activité des neurones restants est accrue, et cette compensation est à l'origine d'une phase latente de la maladie. Les premiers symptômes apparaissent lorsque près de 70 - 80% des cellules nigrales sont détruites. Il est étonnant de constater que cette structure parvient à remplir son rôle avant d'atteindre ce seuil. La principale efférence de la substance noire *pars compacta* est le striatum²⁵ et la majeure partie de ses neurones est dopaminergique. La conséquence biochimique de l'altération de la voie nigro-striatale est la diminution du taux de dopamine dans le striatum. A ce niveau, la dopamine agit premièrement pour moduler l'interaction des récepteurs glutamatergiques et de deux types de récepteurs dopaminergiques (D1 et D2).

²⁵ Le striatum comprend le putamen et le noyau caudé. Ces deux structures sont partiellement séparées par la capsule interne mais un dense réseau de connexions les relie et elles sont similaires de par leur caractéristiques anatomiques et fonctionnelles. C'est pour ces raisons que les deux structures sont intégrées pour former le corps strié ou striatum.

L'impact sur la motricité de la perte sélective des cellules dopaminergiques de la voie nigro-striée ne peut se comprendre qu'en considérant le rôle que joue cette dernière dans l'ensemble formé par les ganglions de la base (striatum, globus pallidus, substantia nigra, et noyau sous-thalamique), le thalamus, et un certain nombre de zones corticales. Les ganglions de la bases forment un ensemble de noyaux sous corticaux (Alexander et Crutcher, 1990). Les entrées motrices vers les ganglions de la base proviennent de l'aire motrice supplémentaire (SMA), du cortex pré-moteur (PMC), du champ occulo-moteur frontal (FEF) et du cortex moteur primaire (CM). Ces aires projettent directement sur le putamen. D'autres entrées proviennent du cortex associatif (aires pariétales et frontales) et du cortex sensoriel. Elles convergent vers le noyau caudé. La plupart de ces connections cortico-basales sont réciproques. La convergence des projections motrices, sensorielles et associatives conforte l'hypothèse fonctionnelle selon laquelle le striatum est un centre essentiel de l'intégration sensori-motrice (Kimura, 1986). Les sorties du striatum projettent vers le globus pallidum interne (GPi) et la substance noire *pars reticulata* (SNr) en suivant schématiquement une voie directe et une voie indirecte. Ces sorties sont redirigées vers le cortex après un relais au niveau des noyaux ventro-latéraux et ventro-antérieurs du thalamus. Les deux structures de sorties GPi et SNr sont également en relation avec le colliculus et les voies extra-pyramidales.

Classiquement, il est supposé que la déplétion des neurones dopaminergiques et la réduction de dopamine striatale provoque une sur-activité du GPi par l'intermédiaire de la voie directe et de la voie indirecte. L'activité de la voie gabaergique inhibitrice reliant le GPi au thalamus diminue l'influence excitatrice de ce dernier sur le cortex moteur. Cette perturbation des boucles cortico-basales serait à l'origine de l'akinésie et de manière plus générale, de la bradykinésie et de l'hypokinésie. Parmi les symptômes moteurs de la maladie de Parkinson seule l'akinésie a été clairement reliée au déficit dopaminergique striatal (Bernheimer, Birkmayer, Hornykiewicz, Jellinger & Settelberger, 1973). D'autres hypothèses impliquant les projections du GPi vers les noyaux du tronc cérébral ou le rôle d'autres sous-populations de neurones dopaminergiques sont avancées pour expliquer, respectivement, la rigidité et le tremblement de repos.

1.3 Un modèle fonctionnel des ganglions de la base

La fonction d'intégration des ganglions de la base est sous le contrôle de l'influence de la voie dopaminergique nigro-striée. Dans le cas de la maladie de Parkinson le déficit en dopamine néostriatale entraîne — sous l'influence combinée de la voie directe et de la voie indirecte — une sur-activation des noyaux de sortie des ganglions de la base et une inhibition excessive du système moteur (Obesso et al, 2000). Les symptômes cardinaux de la maladie de Parkinson (tremblement, rigidité et akinésie/bradykinésie) résultent de ces changements de la neuro-dynamique des ganglions de la base. La figure 31 présente une vue moderne des boucles motrices des ganglions de la base.

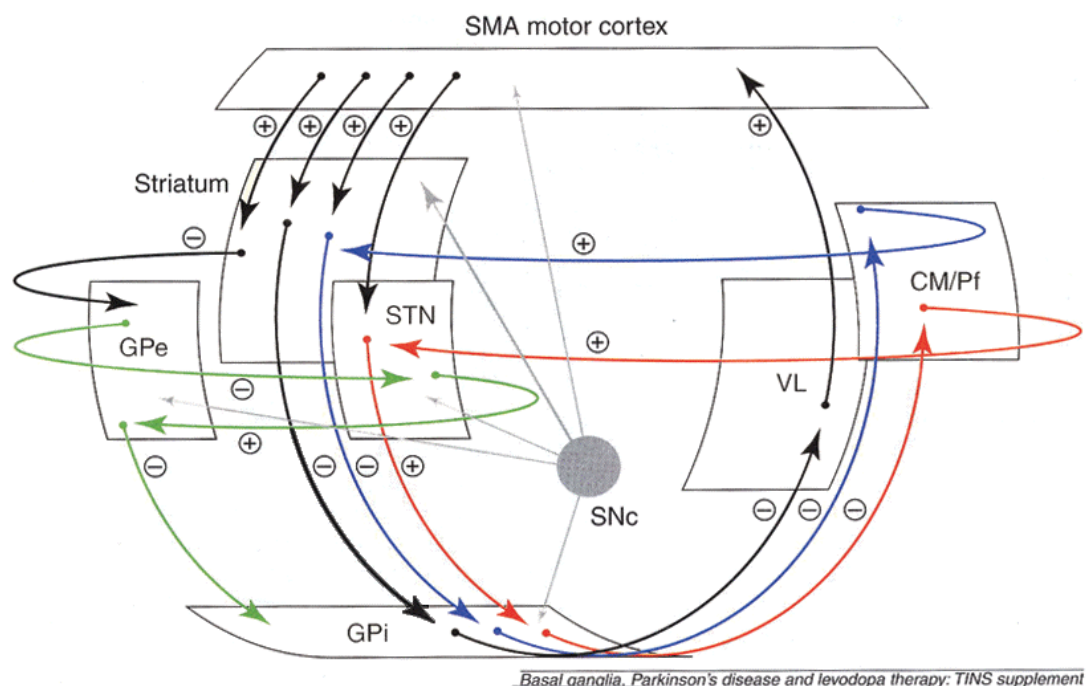


Figure 31. Vue moderne des boucles motrices des ganglions de la base (d'après Obeso, Rodríguez-Oroz, Rodríguez, Lanciego, Artieda, Gonzalo & Olanow, 2000). Des projections parallèles, organisées de manière somatotopiques forment des boucles fermées entre le cortex moteur et les ganglions de la base (flèches noires). Quatre circuits internes au système des ganglions de la base permettent une stabilisation de l'activité. Le complexe centromédian-parafasciculaire (CM/Pf) forme une boucle (CM/Pf-Striatum-GPi-CM/Pf, en bleu) et une boucle (CM/Pf-STN-GPi-CM/Pf, en rouge). La boucle STN-GPe-STN (vert) fonctionnerait comme une boucle d'autostabilisation. Le circuit STN-GPe-GPi peut être vu comme une boucle ouverte interconnectée par laquelle le STN peut avoir une double influence sur le GPi. En effet, le STN contrôle l'activité du GPi par l'intermédiaire d'une voie directe excitatrice (STN-GPi) et d'une voie indirecte inhibitrice (STN-GPe-GPi). Il ne faut pas confondre ces deux voies avec la voie directe (Striatum, GPi/SNr) et la voie indirecte (Striatum, GPe/STN, GPi/SNr) évoquées plus haut. La substance noire *pars reticulata* habituellement présente dans les schémas fonctionnels des ganglions de la base ne se voit pas accorder, ici, un rôle central dans le système. La voie nigro-striée agit premièrement pour moduler l'interaction des récepteurs glutamate et dopamine (D1 et D2) au niveau du striatum. Elle module également l'activité du GPi, du GPe, du STN, et du cortex moteur (flèches grises). *Abréviations : GPe, globus pallidus pars externa ; GPi, Globus pallidus pars interna ; SNc, Substantia nigra pars compacta ; SMA, aire motrice supplémentaire ; STN, noyau sous-thalamique ; VL, Ventralis lateralis, partie ventro-latérale du thalamus.*

Cette revue récente du modèle anatomo-fonctionnel des ganglions de la base souligne l'importance de l'organisation somatotopique des projections corticales. Il est supposé que la fonction centrale de ce système est de fournir un signal "feed-forward" (autrement dit, de servir de prédicteur) pour la préparation et l'exécution des mouvements. Les conceptions récentes des ganglions de la base insistent également, sur le rôle de ce système pour l'estimation du temps (Pastor, Artieda, Jahanshahi & Obeso, 1992; Meck, 1996), la mémoire de travail (Middelton & Strick, 2000) et l'olfaction (Ward, Hess & Calne, 1983).

1.4 Traitement médical : la stimulation cérébrale profonde du noyau sub-thalamique

Le traitement de la maladie de Parkinson peut être pharmacologique. Il s'agit, dans ce cas, de suppléer le déficit en dopamine striatale en administrant des précurseurs de la dopamine ou des inhibiteurs des enzymes qui dégradent ce neuromédiateur. Dans ce cas, le traitement agit essentiellement au niveau du striatum. Depuis quelques années, le traitement peut également être neurochirurgical. La stimulation cérébrale profonde uni-latérale et bi-latérale du noyau sub-thalamique (SCP du NST) ou du GPi constitue, aujourd'hui, un complément et une alternative au traitement dopaminergique. Dans le cas de la SCP du NST, qui nous intéresse plus particulièrement pour notre étude, l'application d'une stimulation à haute fréquence ($> 100\text{Hz}$) a pour effet d'inhiber fonctionnellement le NST, hyperactif dans la maladie de Parkinson. Ce traitement chirurgical de la maladie de Parkinson améliore le score UPDRS, la performance dans des tâches de tapping et le score de dyskinésie des patients les plus atteints (Limousin, Krack, Pollak, Benazzouz, Ardouin, Hoffmann, & Benabid, 1998). La stimulation contribuerait donc au rétablissement d'un certain équilibre dans l'influence que distillent les ganglions de la base sur la motricité.

1.5 Maladie de Parkinson et perception visuelle

Des altérations des traitements visuels précoces, diminuant la sensibilité au contraste et pouvant être responsables d'une partie des troubles visuo-spatiaux, ont été démontrés (Bodis-Wollner, Marx, Mitra, Boback, Mylin, Yahr, 1987). Cependant, les résultats d'une étude récente suggèrent que cette baisse de sensibilité au contraste ne se traduit pas par une dégradation des performances lors d'épreuves de perception visuelle (Mendèz, Sabaté, Garcia-Baez, Santana, Rodriguez, 1998). Les auteurs concluent, dans cette dernière étude, que si le temps requis pour résoudre des tâches visuelles simples augmente avec l'âge (groupe contrôle jeunes), l'augmentation est comparable pour le groupe contrôle de patients âgés et celui des patients atteints de la maladie de Parkinson. Ces résultats ne confortent pas l'hypothèse selon laquelle, parallèlement à ce qui est observé au niveau des performances motrices, la résolution temporelle du système visuel des patients atteints de la maladie de Parkinson diminue.

La présence d'atteintes des fonctions visuo-spatiales, définies comme la capacité d'apprécier les positions relatives d'objets dans l'espace, d'intégrer ces objets dans un cadre spatial cohérent, d'effectuer les opérations régissant ces données, ne sont pas unanimement reconnues (Brown et Marsden, 1990). Si les épreuves d'appariements échouées par les patients atteints de troubles visuo-spatiaux (lésions pariétales) sont réussies par les patients atteints de la maladie de Parkinson, des difficultés apparaissent avec des épreuves plus complexes (épreuve d'orientation des lignes de Benton, figure de Rybakoff; Ransmayr, Schmidhuber-Eiler, Karamat, Engler-Plorer, Poewe & Leidlmaier, 1987). Les résultats de ces différentes recherches suggèrent que les traitements visuo-spatiaux sont préservés et que ce sont seulement l'intégration et l'utilisation des données traitées dans l'élaboration et la gestion de la réponse qui sont perturbées.

1.6 Maladie de Parkinson : contrôle temporel et perception du temps

Nous avons vu dans la partie consacrée au tempo que le système nigro-striatal, le cervelet et le cortex pré-frontal seraient parmi les structures impliquées dans le contrôle temporel des séquences rythmiques (O'Boyle et al, 1996). Les sujets atteints de la maladie de Parkinson ont un tempo plus faible et une variabilité temporelle accrue dans les tâches de tapping (Harrington et al, 1998). Les auteurs pensent que cette variabilité pourrait être due, à la fois, à l'accroissement de la variabilité d'une horloge interne et à l'implémentation de la commande motrice. De même, lorsque des patients Parkinsoniens doivent mémoriser un intervalle de temps, on observe chez eux une distorsion dans l'évaluation selon la valeur de cet intervalle à mémoriser. Ils sous-estiment les durées courtes (<0.700 s) et surestiment les durées longues (>2 s). Cette caractéristique pourrait conduire les patients à juger les stimuli qui composent notre étude expérimentale (des mouvements de traçage et de pointage d'amplitudes variables) d'une manière différente de celle d'un groupe contrôle.

Des études de pharmacologie montrent, sur le rat, que l'administration de méthamphétamines entraîne une sous-estimation de l'intervalle de temps entre deux frappes successives sur un dispositif permettant d'accéder à de la nourriture. En revanche, l'administration d'halopéridol, entraîne une surestimation de ce même intervalle de temps. Ces deux substances ont des propriétés opposées. La première augmente la production de dopamine dans les systèmes dopaminergiques et la seconde est au contraire un inhibiteur de la production de ce neurotransmetteur (Meck, 1996). Ces résultats sont confirmés chez l'homme par l'étude de patients atteints de la maladie de Parkinson (Malapani, Rakitin, Levy, Meck, Deweer, Dubois & Gibbon, 1998). Cette pathologie à dominante motrice est associée à la dégénérescence des neurones dopaminergiques de la substance noire *pars compacta*. Dans l'ensemble, l'activité du système nigro-striatal est perturbée chez ces patients. Les résultats montrent que ces derniers sous-estiment les durées courtes et sur-estiment les durées longues (Pastor et al, 1992). Ce système pourrait constituer la base du mécanisme d'horloge interne suggéré par les travaux précédents. Les impulsions régulières émises par la substance noire seraient accumulées dans la partie dorsale du striatum.

1.7 Maladie de Parkinson et mouvement imaginé

Nous avons vu dans le chapitre consacré aux mouvements imaginés que les atteintes au niveau des aires motrices primaires et motrices supplémentaires s'accompagnent d'une représentation de ce déficit comme en témoigne la bonne corrélation des durées imaginées et réelles. La patiente C.P. dont le cas était abordé précédemment est capable d'imaginer le mouvement perturbé de la partie distale de son membre supérieur gauche. En revanche, les atteintes pariétales de la patiente L.L. entraînent une dissociation des durées imaginées et réelles. Dans le cas des patients atteints de la maladie de Parkinson, et en supposant que les troubles se limitent aux fonctions motrices, une bonne correspondance des durées imaginées et réelles devraient être observées.

L'existence de patient ayant une maladie de Parkinson asymétrique permet de tester intra-sujet, l'impact de l'atteinte des fonctions motrices sur la durée des mouvements réels et imaginés. Ainsi, les résultats de l'étude de Dominey, Decety, Broussolle, Chazot & Jeannerod, (1995) montrent que les patients présentant une asymétrie (akinésie sévère ou légère selon le côté testé) et devant réaliser mentalement ou réellement une tâche de mouvements séquentiels des doigts, reproduisent dans leurs performances mentales la différence observée d'un point de vue moteur. Indépendamment de la question de l'asymétrie, la plupart des études indiquent que les durées des mouvements imaginés et exécutés sont identiques chez les patients affectés par la maladie de Parkinson (Thobois, Dominey, Decety, Pollak, Gregoire, Le Bars & Broussolle, 2000; Thobois, Dominey, Fraix, Mertens, Guenot, Zimmer, Pollak, Benabid & Broussolle, 2002).

Récemment, le débit sanguin cérébral a été étudié pour des mouvements imaginés et réels avec ou sans stimulation gauche du noyau sub-thalamique (Thobois et al, 2000; Thobois et al, 2002). La mesure de la durée des mouvements ne révèle aucune différence entre les mouvements imaginés et réels. L'augmentation du temps de mouvement réel dans les situations sans stimulation est également observée pour les mouvements imaginés. L'exécution de séquences avec une manette manipulée de la main droite, sans stimulation, révèle une activation du cortex moteur primaire gauche, de SMA, du lobe pariétal inférieur, du gyrus frontal inférieur et de la partie latérale du cortex pré-moteur gauche. Le mouvement imaginé, dans les mêmes conditions, s'accompagne d'une activation bilatérale du DLPFC, de SMA, et de la partie droite du

cervelet. La stimulation du noyau sub-thalamique provoque, lors de l'exécution des mouvements, une réduction de l'activité du cortex moteur primaire gauche, de SMA et du lobe pariétal inférieur et une augmentation de l'activité du cortex pré-frontal gauche (incluant le DLPFC), du putamen et du thalamus. Dans la situation d'imagerie avec stimulation, le débit sanguin cérébral augmente bilatéralement dans les régions préfrontales (incluant le DLPFC), le thalamus et le putamen. L'aire motrice supplémentaire et le cortex moteur primaire ont une activité réduite dans cette dernière situation.

1.8 Conclusion

Cet ensemble de données montre l'intérêt de la maladie de Parkinson pour l'étude expérimentale des relations entre motricité et perception. En effet si, comme nous l'avons vu précédemment, la perception des mouvements humains implique une activation motrice intériorisée, les malades parkinsoniens, du fait de leurs difficultés motrices, devraient présenter des difficultés similaires sur le plan perceptif. Sur le plan méthodologique, le fait de pouvoir placer les patients parkinsoniens en phase active ou passive, qu'il s'agisse de l'effet du traitement dopaminergique ou de la stimulation cérébrale du noyau subthalamique, permet d'analyser directement, chez un même sujet, l'existence de liens centraux entre motricité et perception.

2. METHODE

Le matériel est similaire à celui utilisé dans les expériences précédentes. A terme, cette étude devrait comprendre 9 sujets atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson et deux groupes contrôle (un groupe apparié sur l'âge et un groupe étudiant). A ce stade de l'étude, des résultats partiels sont présentés pour trois sujets seulement.

2.1 Sujets

Trois sujets (S1, Male, 44 ans ; S2, M, 64 ; S3, F, 58), tous droitiers, atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson, ont donné leur accord pour un protocole d'étude préalablement approuvé par un comité d'éthique (Loi Huriet). Conformément aux critères d'inclusion les sujets présentent, une absence de démence, (Échelle de la démence de Mattis > 130) ou de dépression (Inventaire de dépression de Beck < 24). Les sujets répondent également aux critères d'inclusion pour un traitement neurochirurgical par stimulation chronique du noyau sub-thalamique (SCT du NST). Les performances des patients dans les différentes tâches composant l'étude seront évaluées avant et après l'opération (1 an), et ce, avec ou sans traitements (L-dopa ou stimulation selon la phase de test). Les épreuves sont du type de celles utilisées jusqu'ici, toutefois quelques modifications mineures ont été apportées pour favoriser l'administration dans le cadre d'études sans bénéfice direct (temps de passation). Tous les patients avaient une vue normale ou corrigée vers la normale. Les atteintes motrices des sujets sont également estimées par le score des patients à la sous-partie III de l'échelle unifiée de notation de la maladie de Parkinson (UPDRS).

2.2 Stimuli

Partie perception. Les stimuli utilisés sont les mêmes que dans les expériences précédentes. Les situation ellipse (C_1 , ellipse) et pointage (C_2 , pointage) ont été retenues pour cette étude (voir figure 19 dans la partie « Préférences perceptives et principes moteurs »). La présentation des stimuli est faite avec le matériel employé dans la partie expérimentale précédente. Le logiciel permet de manipuler indépendamment la longueur (l) de la trajectoire (l = périmètre pour l'ellipse et l = distance*2 pour le pointage) et la période (P) d'un cycle du mouvement (P = durée d'une révolution pour

l'ellipse et d'un aller-retour pour le pointage). Les longueurs des trajectoires présentées sur l'écran étaient identiques pour les deux types de mouvements. Toutefois, contrairement à la situation précédente, les sujets ne font pas plusieurs sessions. Pour une taille donnée, les sujets n'ajustent la vitesse qu'une seule fois. En revanche, dix valeurs ont été choisies de telle sorte que la longueur $l = 2.5e^{0.3x}$, où x = numéro du stimulus (de 1 à 10). Les longueurs de trajectoire correspondantes sont : $l_1 = 3.4 \text{ cm}$; $l_2 = 4.62 \text{ cm}$; $l_3 = 6.29 \text{ cm}$; $l_4 = 8.55 \text{ cm}$; $l_5 = 11.62 \text{ cm}$; $l_6 = 15.8 \text{ cm}$; $l_7 = 21.49 \text{ cm}$; $l_8 = 29.22 \text{ cm}$; $l_9 = 39.73 \text{ cm}$; $l_{10} = 54.02 \text{ cm}$.

Comme dans les expériences précédentes, la période (P) était calculée par rapport au nombre de paires (x, y) définissant la trajectoire. La limite inférieure de P était de 0.05 s. Lors de l'apparition du point sur l'écran la période initiale (P_i) était fixée aléatoirement pour chaque essai (équipartition entre 0.1 s et 5,1 s). Les patients pouvaient ajuster ces périodes (par pas de 0.05 s) à l'aide du clavier. La période finale (P_f) choisie par le sujet constitue la variable dépendante, objet de l'analyse en perception.

Partie production. Deux séries de 10 modèles de trajectoires (en pointillés gris foncés, épaisseur = 0.01 cm) étaient utilisées pour indiquer au sujet l'amplitude du mouvement à exécuter. Les modèles étaient à l'échelle des trajectoires présentées sur l'écran. Dans la condition pointage, les cibles ($\varnothing = 8 \text{ mm}$) étaient également présentes sur ces étalons.

2.3 Procédure

L'expérimentation avait lieu dans une pièce calme. Pour la partie perception, la procédure est similaire à celle mise au point dans la partie expérimentale précédente. Dans cette expérience la consigne est une consigne de mouvement imaginé. Les sujets doivent imaginer qu'il sont en train de tracer l'ellipse à une vitesse spontanée, ou de pointer entre les deux cibles le plus rapidement possible mais sans les rater. La tâche consiste à indiquer avec les touches la vitesse qui correspond au mouvement imaginé. Chaque sujet participe également à une partie production. Il lui est, alors, demandé de dessiner — à l'aide d'un stylo et sur une tablette graphique — des ellipses en continu et à une vitesse spontanée, ou de réaliser des pointages en continu et le plus vite possible entre les deux cibles. Dans le cas des mouvements de pointage, il est précisé que les allers et retours doivent toujours être faits entre les deux cibles et qu'il s'agit d'être

précis. Le stylo ne laisse pas de trace. Il est ajouté que les modèles sont donnés pour se faire une idée de la forme mais qu'il ne s'agit pas de recopiage. Il est demandé d'être le plus spontané et le plus naturel possible. Les conditions d'enregistrements des mouvements sont similaires à celles de l'expérience précédente. Le déplacement du stylo est enregistré pendant un délai variable correspondant, au minimum, à 5 cycles du mouvement requis. Les 10 tailles sont systématiquement présentées aléatoirement.

Avant le début des épreuves proprement dites, les sujets doivent ajuster la vitesse d'un point décrivant un mouvement aléatoire (une session de 20 secondes de gribouillages enregistrée au préalable par l'expérimentateur). Cette tâche a pour but de familiariser les sujets avec le dispositif et avec l'idée de choisir une vitesse. L'ordre de passation des parties perception et production est aléatoire de même que l'ordre de passation des tâches (ellipses, pointages). L'ordre des conditions de traitement en revanche est fixe. Les passations ont lieu le matin entre 7 h 30 et 11 h 30. Pour la phase 1 (pré-opératoire) les patients passent d'abord les 4 épreuves Off-Ldopa (à jeun de traitement depuis la veille au soir). Après administration d'une dose subliminaire de Ldopa (entre 30 *mn* et 1 h 30 de pause selon les patients), les patients effectuent à nouveau les 4 épreuves On-Ldopa cette fois. Lors de la phase 2, l'ordre de passation sera On-stimulation et Off-stimulation. Bien que nous pensons que l'ordre de passation n'est pas le principal déterminant du choix de la vitesse en perception comme en production il sera ainsi possible de vérifier un effet de l'ordre en comparant les deux conditions sans traitement. Le plan d'expérience final comprend un facteur sujet (Parkinson, contrôle apparié sur l'âge, contrôle), un facteur traitement (Ldopa, SCP du NST), un facteur état (On, Off), un facteur modalité (perception, production) et un facteur type de mouvement (ellipse, pointage). Pour l'instant, les résultats ne concernent que la phase 1 et pour 3 sujets.

3. RESULTATS

Les résultats sont présentés en deux parties. Dans un premier temps, nous décrivons les caractéristiques géométriques et cinématiques des mouvements de traçage et de pointage réalisés hors traitement dopaminergique par deux des sujets de cette étude (S1 et S3). Dans cette partie nous illustrerons par l'exemple les résultats des études concernant le contrôle des mouvements chez les sujets atteints de la maladie de Parkinson. Nous verrons comment le signal pourrait être traité pour qualifier la production des sujets souffrant de troubles moteurs. Ensuite, nous quantifierons la modulation de la période finale (P_f) par la longueur de la trajectoire (l) pour les situations ellipse et pointage comme nous l'avons fait dans les expériences précédentes.

3.1 Décrire l'exécution des mouvements de traçage et de pointage

Mouvements de traçage d'ellipses. La figure 32 présente les aspects géométriques et cinématiques des mouvements de traçage d'ellipses des sujets 1 et 3 pour la condition Off-Ldopa. Ces deux sujets sont retenus pour l'exemple car ils présentent deux cas extrêmes. La motricité du membre supérieure droit du sujet 1 semble relativement bien préservée par la maladie. En comparaison, la production motrice du sujet 3 est nettement dégradée. L'atteinte de la capacité à programmer les forces nécessaires au mouvement et la bradykinésie (ralentissement du mouvement) sont clairement visible chez le sujet 3.

La sous-échelle III de l'UPDRS évalue un score général sur des items qui concernent, entre autres, la parole, l'expression faciale, le tremblement de repos, des mouvements des mains et des jambes. En tout, 14 items (notés de 0 à 4 selon la gravité des troubles) déterminent un score global. Les scores de sujets 1 et 3 dans la condition Off-Ldopa sont respectivement de 15.5 et 46,5. Des corrélations entre le score moteur et la qualité de la production motrice sont attendues à l'issue de cette étude. L'évaluation de la qualité de la production motrice des patients atteints de la maladie de Parkinson

peut bénéficier des avantages de l'analyse spectrale de la série temporelle représentant la modulation de la vitesse tangentielle.

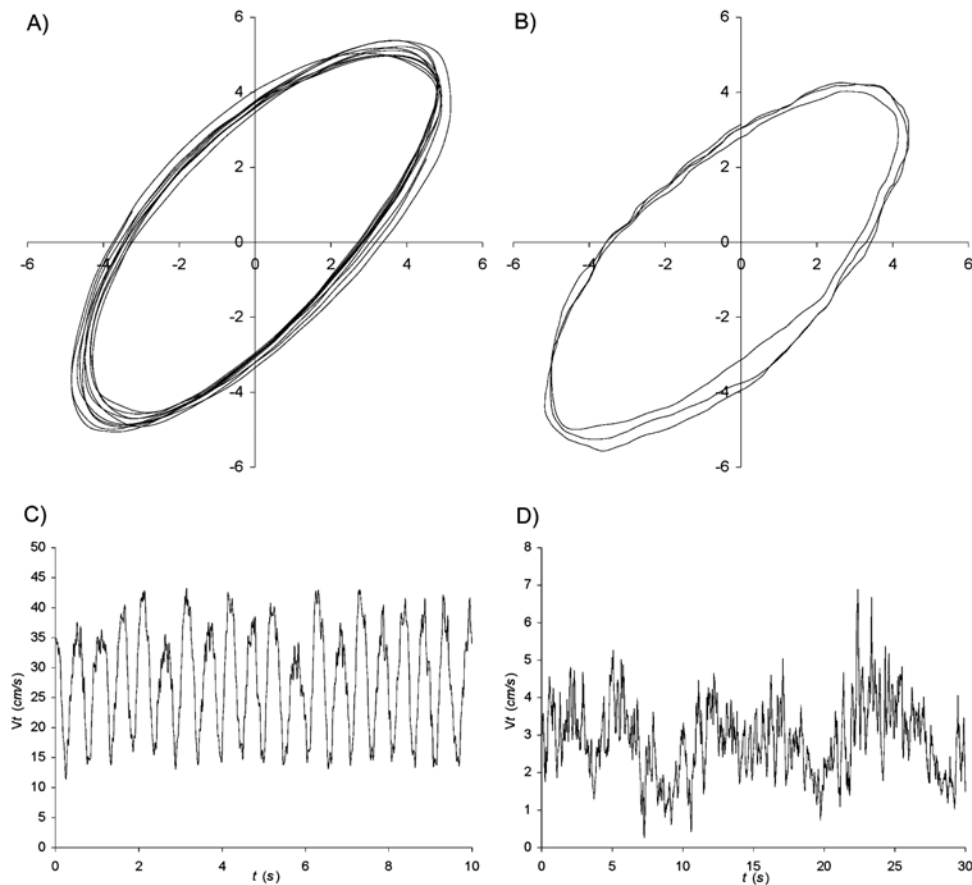


Figure 32. Illustration des troubles moteurs dans la maladie de Parkinson. Traçage d'ellipses ($l = 29,22$ cm), condition Off-Ldopa. Les aspects géométriques de la trajectoire sont bien préservés pour le sujet 1 (A), relativement au sujet 3 (B). Pour ce dernier, le contour de l'ellipse est marqué par une ondulation caractéristique. Le profil de vitesse tangentielle du sujet 1 (C) témoigne de la bonne préservation des fonctions motrices liées aux traçages. La vitesse moyenne du geste est élevée et les pics sont clairement identifiables. En revanche, il est beaucoup plus difficile pour le sujet 3 (D) de produire une succession régulière d'accélération et de décélération (notez le changement d'échelle temporelle). La vitesse moyenne du geste est faible, le signal est très bruité. Le score UPDRS Off-Ldopa (sous-échelle III, score moteur) est de 15.5 pour le sujet 1 et 46,5 pour le sujet 3 (un score faible indique une activité motrice préservée, score maximum = 56).

L'objectif de l'analyse spectrale de Fourier est de décomposer des séries chronologiques complexes avec des composantes cycliques en quelques fonctions (sinus et cosinus) sinusoïdales sous-jacentes de longueurs d'ondes particulières. Les résultats de l'analyse peuvent permettre de découvrir quelques cycles récurrents de différentes longueurs dans les séries chronologiques en question, et qui à première vue ressemblaient plus ou moins à du bruit aléatoire. La figure 33 A et B donne un aperçu

des résultats de l'analyse spectrale des profils de vitesse présentés sur la figure 32 (C et D respectivement). Pour le sujet 1, un pic net de densité spectrale est observé pour des périodes comprises entre 0,46 et 0,57 s. La période pour une ellipse peut ainsi être estimée entre 0,92 et 1,14 s. L'analyse du profil de vitesse du sujet 3 (figure 33 B) indique, en revanche, que de multiples fréquences se superposent dans le signal. Des pics de densité correspondants aux périodes les plus représentés dans le signal (de 5,12 à 10,24 s par cycle) restent cependant identifiables. Pour le sujet 3, le traçage d'une ellipse de 29,22 cm nécessite entre 10,24 et 20,48 s.

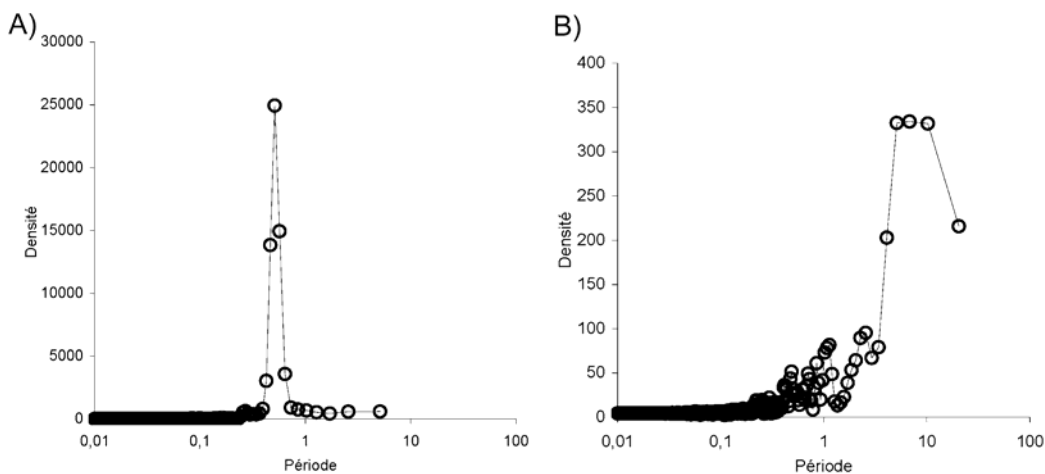


Figure 33. Description des profils de vitesse tangentielle en utilisant une transformée de Fourier. Le signal original (figure 32, C et D) est décomposé en fonctions sinusoïdales sous-jacentes de longueurs d'ondes particulières. Pour le sujet 1 (A), un pic de densité spectrale est enregistré pour les périodes de 0,51 s. Pour le sujet 3 (B), le signal est plus bruité. Le pic de densité spectrale correspond effectivement à une périodicité reflétant le mouvement de traçage d'ellipses mais de nombreuses composantes, ayant des périodes plus courtes, sont également présentes dans le signal. La valeur de la densité spectrale (axe y) dépend de la vitesse moyenne du mouvement. L'utilisation des fonctions associées à la transformée de Fourier devrait permettre d'analyser en détail la production motrice des patients.

La transformée de Fourier permet d'isoler les composantes de fréquences (le nombre de cycles par unité de temps), de calculer des coefficients qui peuvent s'interpréter comme des coefficients de régression, c'est-à-dire qu'ils nous renseignent sur le degré auquel les fonctions sinus et cosinus respectives sont corrélées aux données pour les fréquences testées et d'estimer la variance et la densité des données pour chaque longueur d'ondes testée (périodogramme et estimation des densités spectrales). Bien qu'elle mérite d'être développée plus en détail, nous pensons que l'analyse

spectrale offre une occasion de catégoriser les différents sujets de cette étude en fonction de la quantité de bruit aléatoire dans le signal, de la cohérence du signal pour les fréquences les plus représentées, et des valeurs des périodes. La composition spectrale du profil de vitesse tangentielle pourrait représenter une signature typique de l'état moteur du sujet au moment de la passation des différentes épreuves.

Mouvements de pointage. La figure 34 illustre la production des sujets 1 et 3, toujours en condition Off-Ldopa, mais cette fois dans le cas des mouvements de pointage. Pour ce type de tâche, nous retrouvons les caractéristiques de la production telles que nous les avons décrites dans le cas de l'ellipse. La motricité du membre supérieur du sujet 1 est préservée comparée à celle du sujet 3.

Il est possible d'utiliser la transformée de Fourier pour analyser la production des mouvements de pointage, quoique la question des pauses (discontinuité dans le signal) mérite de faire l'objet d'une simulation. Nous ne représentons pas ici la production des sujets dans la condition On-Ldopa. Cette section a une vocation essentiellement descriptive. La comparaison des situations On et Off-Ldopa est faite sur la base des résultats de l'analyse de la relation entre P_f et l (section suivante). Pour l'instant, nous voulons souligner que la méthode d'estimation de la période des mouvements de traçage et d'écriture utilisée jusqu'ici (basée sur le calcul d'un vecteur représentant une quantité géométrique) permet d'estimer la période nécessaire pour compléter un cycle du mouvement relativement indépendamment de la question du bruit dans le signal de vitesse. Par souci d'uniformité, c'est cette méthode qui est employée pour l'analyse des résultats des trois sujets ayant participé à l'étude au moment où nous rédigeons cette partie expérimentale.

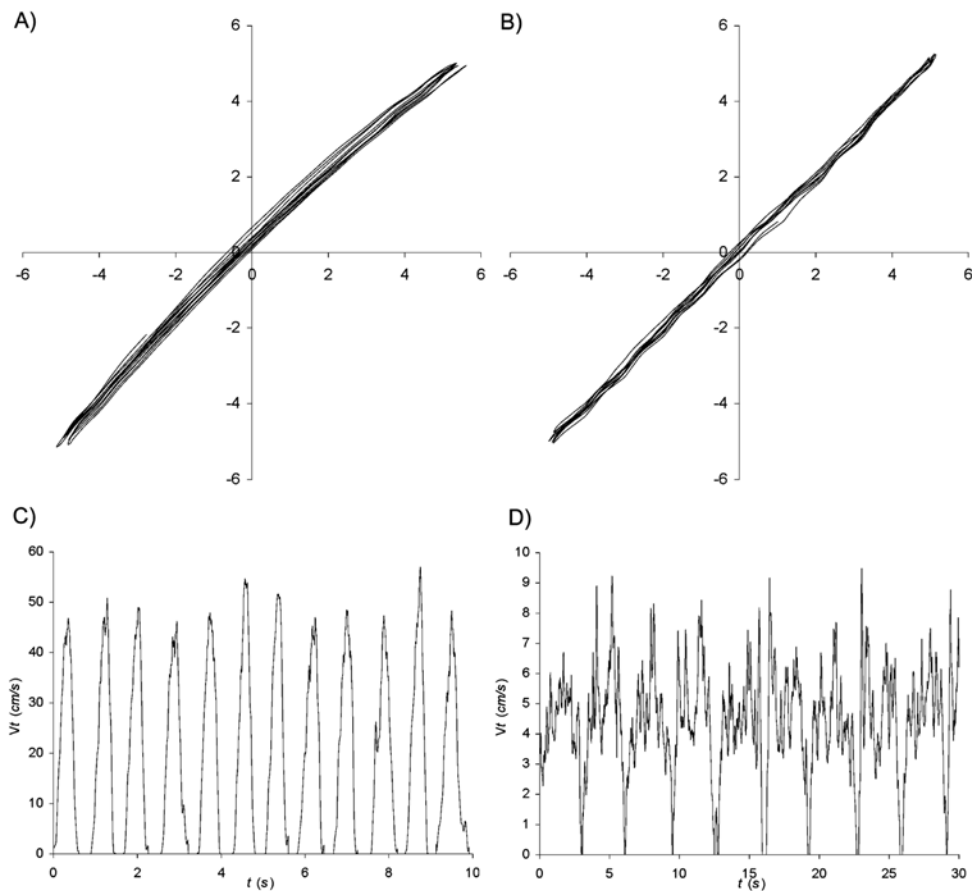


Figure 34. Illustration des troubles moteurs dans la maladie de Parkinson. Mouvements de pointage ($l \times 2 = 29,22 \text{ cm}$), condition Off-Ldopa. Les aspects géométriques de la trajectoire sont bien préservés pour le sujet 1 (A), relativement au sujet 3 (C). Pour ce dernier, un tremblement d'action (l'ondulation caractéristique visible sur la trajectoire). Le profil de vitesse tangentielle du sujet 1 (B) montre que la vitesse moyenne du geste est élevée. Le mouvement pourrait être qualifié de balistique, il n'y a pas ou peu de sous-mouvements. Une pause à chaque extrémité de la cible est marquée. En revanche, il est beaucoup plus difficile pour le sujet 3 (D) de produire une succession régulière d'accélération et de décélération (notez le changement d'échelle temporelle). La vitesse moyenne du geste est faible, le signal est très bruyé.

3.2 Relation entre P_f et l

Dans cette expérience, 10 longueurs de trajectoires sont utilisées. Les sujets sont testés dans une condition Off-Ldopa et dans une condition On-Ldopa. Les mouvements produits et perçus sont des tracés d'ellipses et des pointages entre deux cibles. Les résultats sont partiels et, hormis la corrélation, aucune analyse n'est faite sur les données. Nous allons commencer par présenter les résultats obtenus pour les ellipses puis nous présenterons les résultats concernant les pointages.

Ellipses. La figure 35 résume les observations pour le traçage d'ellipses. La répartition des données, le long d'une droite sur l'échelle logarithmique, suggère que la relation entre la période d'un cycle du mouvement perçu ou produit et la longueur de la trajectoire peut être interpolée par une fonction de puissance ($P_f = P_o l^\gamma$). Les résultats présentés dans le tableau 3 indiquent effectivement une corrélation forte de P_f et l pour tous les sujets, quelle que soit la modalité et la condition.

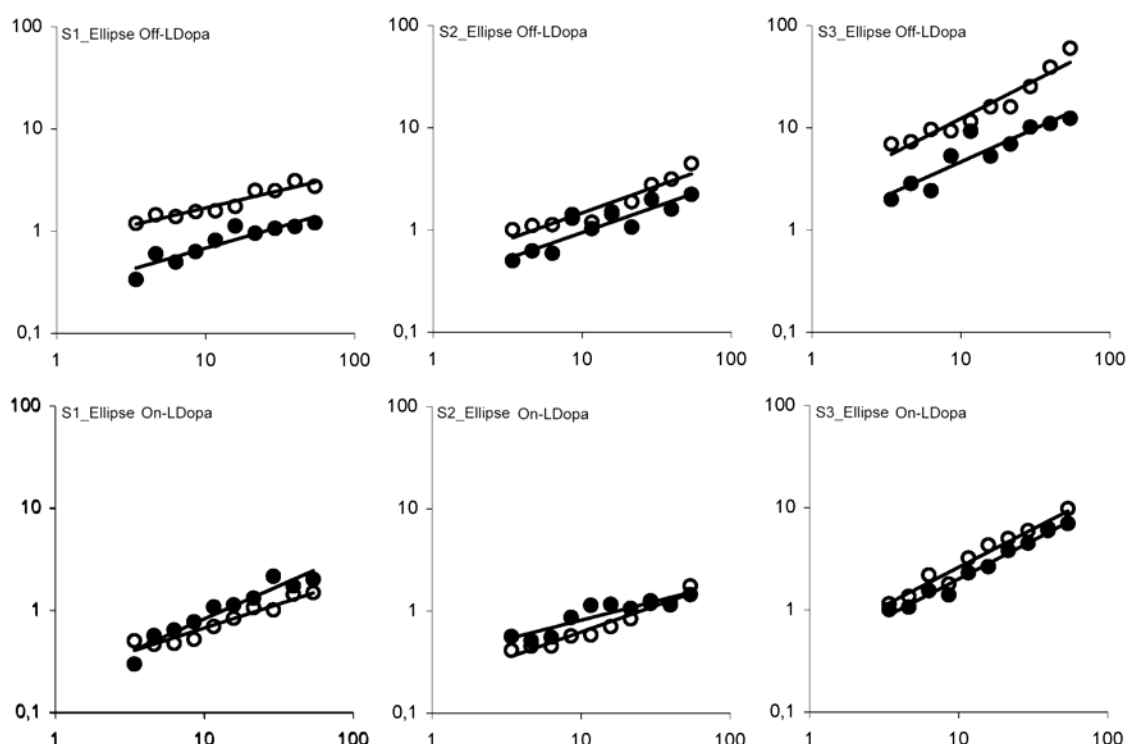


Figure 35. Relations entre la longueur de la trajectoire (axe x log, l en cm) et la période exécutée ou choisie par les sujets (axe y log, P_f en s) dans le cas du traçage d'ellipses. Les marques blanches représentent les résultats en perception et les marques noires représentent les résultats en production. Dans tous les cas il semble que la relation entre P_f et l puisse être décrite par une fonction de puissance. Toutefois, l'estimation des paramètres de la régression est nécessaire pour confirmer cette impression (voir texte). Une différence entre la situation de perception et la situation de production est clairement visible chez le sujet 1 (Off et On-LDopa). Cette tendance est également visible pour les sujets 2 et 3 dans la situation Off-LDopa. Pour le sujet 3, la faible vitesse des mouvements décrite précédemment se traduit par des temps de mouvements importants (60 s pour une ellipse d'une longueur de 54.22 cm). Chez ce sujet, la tendance à l'isochronie semble moins prononcée que pour les autres sujets (la pente de la droite semble plus forte). Notez que, bien que la production puisse être considérablement altérée dans la maladie de Parkinson, le principe d'isochronie semble rester valable.

Si l'on admet que le principe d'isochronie est présent tant que la valeur de l'exposant γ n'est pas supérieure ou égale à 1, alors, il est clair que les patients atteints de la maladie de Parkinson montrent encore une nette tendance à l'isochronie en

perception, comme en production. L'examen des valeurs de l'exposant (tableau 3), bien que plus ambiguë, permet d'envisager un effet d'interaction entre la modalité (perception, production) et la condition (Off-Ldopa, On-Ldopa). L'exposant serait sensible à la L-dopa pour la production mais pas pour la perception.

Les résultats sont partiels, mais l'examen de la table 3 permet, également, de voir l'effet du traitement dopaminergique sur le facteur $\log P_o$ qui représente le tempo du mouvement (perçu et produit). Comme attendu de la part d'un traitement destiné à lutter, entre autre, contre la rigidité et la bradykinésie, le tempo des mouvements augmente sous l'effet de la Ldopa (sauf sujet 2 en production). Pour ce paramètre nous attendons, également, un effet d'interaction entre la modalité (perception, production) et la condition (Off-Ldopa, On-Ldopa). Le tempo serait plus sensible à la Ldopa lors de la perception que lors de la production. La forte augmentation du tempo en perception entre les conditions Off et On expliquerait la bonne correspondance des périodes produites et préférées dans la condition On-Ldopa. Les valeurs de paramètres mesurées dans la situation de pointage sont-elles compatibles avec ces observations ?

Tableau 3. Paramètres des régressions de puissance de P_f et l pour le traçage d'ellipses. Un effet de la L-dopa sur les tempos choisis en perception apparaît clairement.

Sujets	Cond	Ellipse					Production				
		Perception					Production				
		$\log P_o$	γ	ρ	P_o	Tempo	$\log P_o$	γ	ρ	P_o	Tempo
S_1	Off	-0,11	0,34	0,95	0,78	77	-0,58	0,42	0,92	0,26	231
S_2	Off	-0,35	0,52	0,94	0,45	133	-0,53	0,51	0,91	0,3	200
S_3	Off	0,34	0,75	0,96	2,19	27	0,01	0,66	0,92	1,02	59
S_1	On	-0,64	0,47	0,96	0,23	261	-0,73	0,64	0,96	0,19	316
S_2	On	-0,72	0,51	0,97	0,19	316	-0,46	0,37	0,91	0,35	171
S_3	On	-0,33	0,75	0,98	0,47	128	-0,45	0,76	0,99	0,35	171

Pointages. La figure 36 résume les résultats obtenus pour les mouvements de pointage. L'observation des données indique, comme précédemment, que la relation entre la période d'un cycle du mouvement perçu ou produit et la longueur de la trajectoire peut être interpolée par une fonction de puissance ($P_f = P_o l'^r$). Les résultats présentés dans le tableau 4 indiquent, encore, une corrélation forte de P_f et l chez tous les sujets, quelle que soit la modalité et la condition.

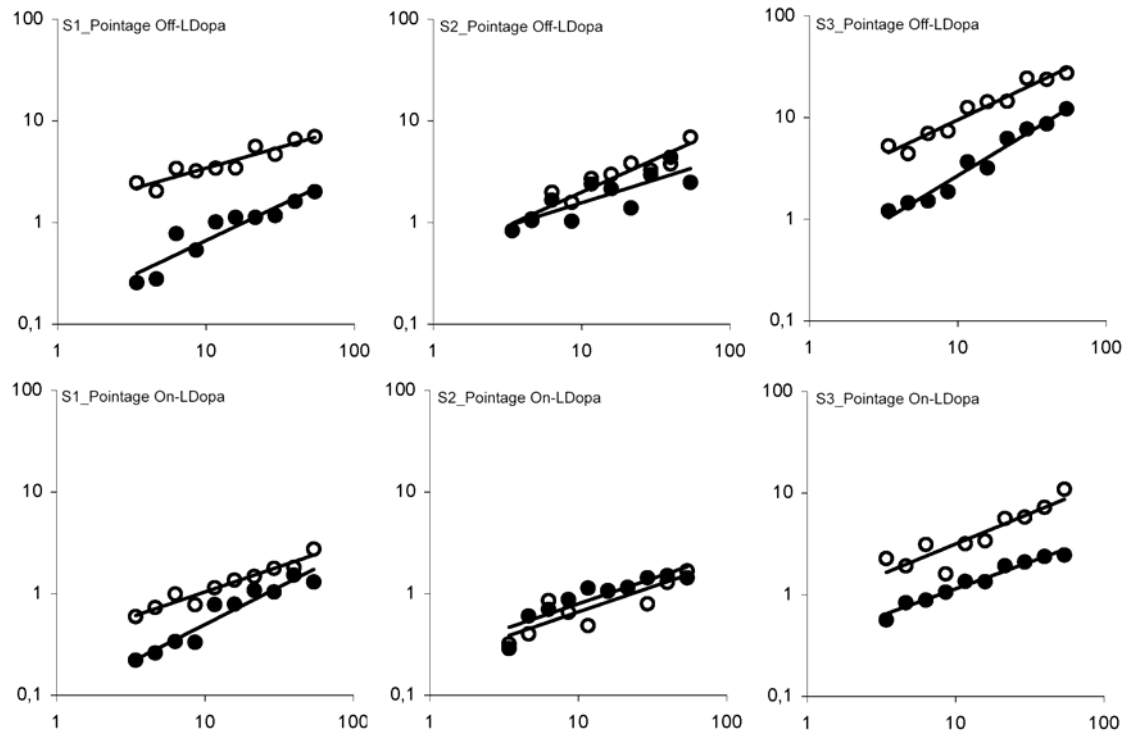


Figure 36. Relations entre la longueur de la trajectoire (axe x log, l en cm) et la période exécutée ou choisie par les sujets (axe y log, P_f en s) dans le cas des mouvements de pointage. Les marques blanches représentent les résultats en perception et les marques noires représentent les résultats en production. Comme dans le cas des ellipses, des différences de P_f entre la situation de perception et la situation de production sont clairement visibles pour les sujets 1 et 3 mais pas pour le sujet 2.

L'examen des valeurs de l'exposant ne permet pas de discuter de l'impact de la thérapie sur l'interaction de P_f et l dans les situations de pointage. L'examen du tableau 4 permet, en revanche, de confirmer l'effet du traitement dopaminergique sur le tempo du mouvement (perçu et produit). Pour tous les sujets, et quelle que soit la modalité, le tempo des mouvements augmente sous l'effet de la Ldopa.

Tableau 4. Paramètres des régressions de puissance de P_f et l pour les mouvements de pointage.

Sujets	Cond	Pointage						Production				
		Perception			Tempo			Perception			Tempo	
		logPo	γ	ρ	Po	Tempo		logPo	γ	ρ	Po	Tempo
S_1	Off	0,12	0,41	0,94	1,32	45		-0,87	0,69	0,93	0,13	462
S_2	Off	-0,36	0,66	0,95	0,44	136		-0,26	0,46	0,81	0,55	109
S_3	Off	0,29	0,69	0,97	1,95	31		-0,46	0,89	0,98	0,35	171
S_1	On	-0,48	0,5	0,97	0,33	182		-1,04	0,74	0,96	0,09	667
S_2	On	-0,68	0,5	0,86	0,21	286		-0,6	0,5	0,9	0,25	240
S_3	On	-0,1	0,6	0,9	0,79	76		-0,47	0,53	0,98	0,34	176

4. DISCUSSION

Cette étude avait pour but de tester les relations entre la perception et l'action chez des patients atteints de la forme idiopathique de la maladie de Parkinson.

Les coefficients de corrélation de la régression de puissance des valeurs de P_f et l indiquent que chez les patients atteints de la maladie de Parkinson une relation existe entre l'amplitude des mouvements produits ou imaginés et la période préférée. Comme dans les expériences précédentes, le principe d'isochronie est observé pour la production et la perception de mouvements elliptiques d'amplitudes différentes. Une relation entre P_f et l est également observée pour les mouvements de pointage, toutefois, la comparaison des situations ellipse et pointage au niveau individuel ne permet pas de tester l'hypothèse d'une influence spécifique des lois motrices régissant ces deux types de mouvements (ellipse et pointage).

Les situations de perception et de production ne sont pas comparées statistiquement compte tenu du faible effectif de la population et de l'absence de groupe contrôle. Toutefois, dans cette expérience, comme dans les précédentes, il est très probable que le tempo en perception soit plus faible qu'en production, et ce, indépendamment du traitement administré.

Dans leur ensemble les résultats montrent que la méthode est adaptée à la mesure des relations entre perception et action dans le cas de la maladie de Parkinson. L'analyse finale, avec deux groupes contrôles (âges équivalents et étudiants), la mesure de la variabilité spatiale et cinématique des mouvements produits et l'ajout des conditions On et Off stimulation profonde du NST devrait permettre de dresser un tableau complet de l'état de la perception et de la production des mouvements de traçage et d'écriture chez les patients atteints de la maladie de Parkinson.

Finalement, la mesure d'un effet des différents traitements (Ldopa et SCP du NST) sur les paramètres mesurés, avec ou sans interaction avec la modalité testée devrait permettre de préciser les caractéristiques des liaisons fonctionnelles entre la perception et la production des mouvements humains.

DISCUSSION GENERALE

Le but des recherches présentées dans ce document était de démontrer que les jugements perceptifs, concernant des stimuli dynamiques représentant des mouvements humains, impliquaient l'intervention de la motricité. Cette contribution de la motricité à la perception se ferait par l'intermédiaire d'une simulation motrice intériorisée. Plus précisément, nous faisons l'hypothèse que la préférence perceptive des sujets, pour la vitesse moyenne des mouvements humains, révèle une influence latente de leur propre motricité. Dans leur ensemble, ces recherches visaient à démontrer et à préciser les mécanismes, et les conséquences, de cette contribution implicite de la motricité à l'activité perceptive.

Pour cela, nous avons dans un premier temps réalisé une expérience utilisant la tomographie par émission de positons dans le but de mettre en évidence les réseaux corticaux intervenant lors de la perception visuelle des mouvements d'écriture et de pointage.

Ensuite, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux caractéristiques de la préférence perceptive et à la façon dont celles-ci sont modulées en fonction de la représentation que le sujet a du mouvement, de la longueur de la trajectoire, du type de mouvement (ellipse, trait, pointage), du niveau de développement moteur, et de l'état du système moteur des sujets (maladie de Parkinson).

Nous allons rapidement rappeler les principaux résultats de ces recherches avant de passer à une discussion plus générale concernant la simulation motrice intériorisée ainsi que la préférence perceptive.

1. NEUROIMAGERIE

L'objectif était, non seulement, de mettre en évidence les corrélats neuroanatomiques de l'anticipation perceptive mais, également, d'illustrer la façon dont la simulation neurale, en tant qu'interprétation du sens que revêt l'activation d'un ensemble d'aires motrices dans des tâches de perception, pouvait être utilisée pour rendre compte de la capacité des sujets à prédire l'identité de séquences motrices. Pour résumer, les résultats indiquent que l'anticipation perceptive des mouvements de pointage active des aires corticales spécifiques, connues pour être impliquées dans la planification des mouvements de pointage. Dans la condition d'anticipation perceptive

des mouvements d'écriture, les résultats sont plus ambigus. Toutefois, les résultats de l'étude d'un cas de dysgraphie (Chary et al, 2003) permettent d'affirmer que notre capacité à anticiper les mouvements humains dépend de l'intégrité des circuits impliqués dans la production des mouvements correspondants. Il est donc possible d'interpréter l'anticipation perceptive comme étant le résultat d'un processus de simulation motrice intériorisée.

2. PREFERENCE PERCEPTIVE POUR LA VITESSE

Les expériences ont consisté dans un premier temps à caractériser la préférence perceptive et à comparer les vitesses imaginées et préférées. Puis, nous avons analysé l'influence de la longueur des trajectoires pour vérifier si la période préférée co-variait avec la longueur de la trajectoire présentée. L'influence du type de mouvement (ellipse, trait, pointage) a également été testée. Enfin, nous avons vérifié si la préférence perceptive dépendait de l'âge des sujets et de la présence d'une pathologie à dominante motrice (Parkinson).

2.1 Caractéristiques de la préférence perceptive

Le résultat principal de ces premières études est que les valeurs des périodes préférées des sujets varient dans des proportions qui laissent supposer l'existence d'une tendance centrale des choix. Les coefficients de variation sont concentrés dans une zone entre 5 et 30 %. Bien que les variations puissent être plus importantes, nous pensons que pour la majorité des sujets testés il existe une période de référence propre à chaque sujet.

Les résultats montrent également que le fait de placer les sujets dans une situation de mouvement imaginé ne produit pas de résultats sensiblement différents de ceux obtenus dans la situation de base (vitesse préférée). En donnant au sujet des prototypes de mouvements humains et en faisant porter l'attention sur la vitesse de ces mouvements, nous pouvons penser que la motricité a été activée de façon subliminaire. C'est de l'influence de cette activation sur le comportement du sujet que résulterait la distribution des réponses finales mesurées.

2.2 Modulation de la période préférée en fonction de la longueur de la trajectoire

Chez l'adulte, la relation entre la période finale choisie et la longueur de la trajectoire peut être, systématiquement, représentée par une fonction de puissance (annexe 5). Ainsi, la période de référence du sujet peut être envisagée comme dépendante d'un tempo fondamental et d'un paramètre d'échelle. Les travaux précédents dans le domaine du contrôle moteur, et nos propres résultats, indiquent que le rapport du temps de mouvement à la longueur de la trajectoire présente le même profil. Lorsque la longueur de la trajectoire du stimulus augmente, les périodes préférées (P_f) et exécutées subissent une modulation qui prend la même forme. Dans le cas de l'ellipse et du trait, cette modulation de P_f par l peut être assimilée à une "isochronie perceptive". Ce qui pourrait n'être qu'une simple similarité est également le signe d'une relation entre la perception et l'action au niveau intra-individuel, comme l'indique la corrélation des paramètres des régressions de puissances. Chez un même sujet, la perception et la production sont liées. Cette relation est complexe, et ne peut être complètement décrite tant que la question de l'influence de la variabilité spatiale n'aura pas été traitée.

2.3 Modulation de la période préférée en fonction du type de mouvement présenté

Nous avons vu ci-dessus que lorsque la longueur du stimulus est variée, les périodes préférées et exécutées subissent une modulation qui prend la même forme. En production, les paramètres qui résument la relation entre P_f et l dépendent du type de mouvement produit (ellipse, trait, pointage). Les résultats de nos recherches indiquent, chez l'adulte, que cette spécificité est également présente lors de la perception de ces différents types de mouvements. En effet, on constate un effet du type de mouvement sur la tendance centrale des paramètres de la régression de puissance, en perception comme en production. L'influence du facteur type de mouvement étant comparable en perception et en production nous avons ici un deuxième type d'argument en faveur de relations entre la perception et l'action. Cet argument, qui est moins direct que la corrélation des valeurs des paramètres de la régression, permet cependant de supposer une sensibilité intra-individuelle au type de mouvement présenté. La période de référence dépend donc, également, de la forme de la trajectoire (rectiligne versus curviligne) et de la présence d'une cible.

2.4 Modulation de la période préférée en fonction de l'âge et de la neuropathologie

La relation entre la période de référence et la longueur de la trajectoire des mouvements elliptiques, constatée chez les adultes et assimilable à un principe d'isochronie, est également présente chez l'enfant. Ce résultat, obtenu en perception dans le cas de l'ellipse est cohérent avec les résultats obtenus par Viviani et Schneider, (1991) pour la production d'ellipses de tailles comparables.

Chez les patients atteints de la maladie de Parkinson, le principe général de co-variation entre la longueur de la trajectoire et la période préférée est observé en perception comme en production. Le faible nombre de sujets ne permet pas, toutefois, de discuter de la présence (ou de l'absence) d'une modulation différente selon le type de mouvement présenté (ellipse ou pointage). Enfin, il est notable que l'administration du traitement dopaminergique influence la perception comme la production. Cet effet pourrait constituer un argument supplémentaire pour supposer une dimension commune aux deux modalités.

Avant de discuter de la signification théorique de ces différents résultats, nous voulons traiter de quelques points de méthodologie qui, s'ils n'invalident pas les résultats présentés, méritent cependant d'être soulignés.

2.5 Remarques méthodologiques

Dans les différentes recherches réalisées, nous n'avons pas abordé la question de la préférence perceptive dans le cas des mouvements « non biologiques », c'est-à-dire dans le cas de mouvements n'obéissant pas à la loi de la puissance $2/3$ pour les ellipses, ou ne présentant pas un profil de vitesse en cloche pour les pointages. Nous voulons insister sur le fait que les résultats de ces recherches ne nécessitent pas un contrôle du rôle de la nature biologique du mouvement sur la modulation des préférences en perception. Imaginons, maintenant, que les mêmes résultats soient obtenus en perception pour des stimuli non-biologiques. Dans ce cas, l'hypothèse d'une prégnance perceptive des règles motrices ne s'en trouverait que renforcée. En revanche, si l'on observait des différences dans les résultats en perception, si des déviations vis-à-vis des règles motrices étaient notables, nous pourrions alors évoquer un effet de compatibilité dynamique (Viviani, 2002).

L'effet d'attraction permet de supposer que le tirage aléatoire des périodes initiales est la situation qui minimise l'impact de cette contrainte liée à la tâche (le point doit bien avoir une vitesse de départ) sur l'estimation de la période moyenne. De plus, toujours en raisonnant à partir de l'effet d'attraction, il doit être également possible de démontrer que cette même situation de tirage aléatoire est celle qui maximise la variabilité intra-individuelle.

Un autre aspect de la tâche de perception qui mériterait notre attention est le rôle possible de l'orientation du plan dans lequel se déroule la tâche. Les mouvements sont exécutés dans un plan horizontal mais sont perçus dans un plan vertical. Cette hypothèse nous semble cependant nettement moins attrayante que celle de la variabilité spatiale car nous n'avons pas trouvé de travaux montrant que les mouvements de traçage et de pointage sont moins rapides lorsque l'influence de la gravité n'est pas uniforme le long de la trajectoire. Des différences de forme des trajectoires et une asymétrie des profils de vitesse ont été discutées (Papaxanthis, Pozzo, Popov & McIntyre, 1998 ; Pozzo, Papaxanthis, Stapley & Berthoz 1998 ; Papaxanthis, Pozzo, Vinter & Grishin, 1998) mais rien ne laisse supposer que la différence de tempo entre les mouvements perçus et produits puisse être attribuée au rôle du plan (vertical ou horizontal) dans lequel se déroule la tâche.

Finalement, avec un contrôle approprié de la variabilité spatiale, il est possible que les corrélations mesurées entre les caractéristiques temporelles de la perception et de la production, soient plus élevées (IX.2.4). Quoi qu'il en soit, ces corrélations sont d'ores et déjà significatives, de telle sorte qu'il est possible d'affirmer que la préférence perceptive illustre la contribution du système moteur à la perception visuelle des mouvements humains. Nous allons maintenant discuter de la signification théorique des résultats des différentes recherches présentées dans ce document.

3. DISCUSSION

3.1 La simulation motrice : un processus par défaut ?

Nous avons vu que le mouvement imaginé implique ce qu'il a été convenu de nommer une simulation motrice intériorisée. Les résultats de nos recherches suggèrent que la tendance centrale des périodes préférées par les sujets ne diffère pas de la tendance centrale des périodes imaginées par d'autres sujets. Cette absence de différence, observée au niveau du groupe conduit à penser que la préférence perceptive serait indépendante, au niveau individuel, du statut implicite ou explicite (inconscient ou conscient) de la simulation motrice.

Si nous admettons que dans les situations de mouvements imaginés la période du mouvement dépend de l'activation des zones motrices il est tentant de supposer que ces mêmes zones contribuent à déterminer les vitesses préférées, sans pour autant que l'on puisse parler de mouvement imaginé. Dans la théorie de la simulation, deux niveaux sont distingués selon que le sujet est conscient ou inconscient du fait que des représentations motrices sont mises en jeu par la tâche (Jeannerod, 2001). Nos résultats montrent que le passage au plan conscient ne produit pas de modifications notables au niveau du groupe. En supposant cette similarité au niveau intra-individuel, on peut penser que les modèles internes servant la planification et le contrôle des actions (sans lesquels il n'y aurait vraisemblablement pas de représentations motrices), déterminent la préférence perceptive, qu'ils soient, ou non, consciemment utilisés par le sujet.

Peut-on alors penser que la simulation est un processus par défaut ? Tout dépend, en fait du sens donné à la notion de simulation. Dans la définition originale, la simulation désigne le but de l'activation d'un ensemble d'aires motrices dans des situations de mouvements imaginés, de jugements relatifs à l'action, ou de perception visuelle d'objets ou de mouvements. La simulation, ainsi définie, serait donc, dans notre situation, un processus par défaut. Toutefois, il faut noter que la simulation motrice désigne à la fois un but (simuler), théorique, et une observation (les aires motrice sont activées dans les situations de mouvements imaginés). Il peut être utile de distinguer l'activation des aires motrices accompagnant une simulation "consciente" du mouvement, de l'activation des aires motrices accompagnant une résonance "inconsciente" au mouvement. Ceci nous amène à nous interroger sur le statut de la préférence perceptive.

3.2 Qu'est ce que la préférence perceptive ?

Nous avons vu que les stimuli obéissant à la loi de la puissance $2/3$ étaient associés à une sensation d'uniformité (Viviani et Stucchi, 1991). Les jugements des sujets convergent vers une valeur qui caractérise la relation entre la vitesse et la courbure des mouvements humains. Dans ce cas, la préférence perceptive est orientée vers ce qui est biologiquement plausible et les alternatives proposées sont, en revanche, biologiquement improbables. Dans nos recherches, nous pensons que la préférence perceptive est orientée vers ce qui est personnellement plausible et que les alternatives possibles écartées par le sujets le sont parce qu'elles sont personnellement, moins plausibles. L'alternative n'est pas entre un mouvement biologique et des mouvements non-biologiques, elle est parmi des mouvements biologiques.

Ceci nous ramène à l'opposition entre les caractéristiques motrices générales, propres à l'espèce, et les caractéristiques motrices spécifiques, propres à chaque individu. Parmi ces dernières nous pouvons envisager que le tempo moteur spontané du sujet (estimé par le facteur de la régression de puissance, P_0), mais aussi les règles de productions motrices (principe d'isochronie, influence des contraintes de précision) contribuent à définir la valeur de la préférence perceptive au niveau individuel. La corrélation mesurée entre la perception et la production fournit un argument en ce sens. La valeur des paramètres de la régression en production, qui signent l'identité « motrice » du sujet (sa propension à l'isochronie par exemple), n'est pas indépendante de la valeur des paramètres qui résument la préférence perceptive de ce même sujet.

La préférence perceptive serait donc la manifestation d'une tendance naturelle du sujet à préférer des stimuli dynamiques qui ont des caractéristiques temporelles compatibles avec sa propre motricité. Cette tendance naturelle serait présente au niveau inconscient. Le jugement perceptif serait attiré par une solution (une valeur finale) qui serait déterminée par le système moteur.

3.3 Conclusion

Que peut-on dire en définitive de la préférence perceptive ? Elle serait le résultat de la combinaison d'un tempo fondamental et de principes moteurs actualisés par les caractéristiques de la tâche (longueur et forme des trajectoires, variabilité spatiale tolérée). Si nous supposons qu'un tempo fondamental détermine la période finale choisie, nous pouvons admettre que la valeur de préférence perceptive pour un stimulus donné, est propre à chaque individu, renforcée par la pratique et dépendante du niveau d'activité physiologique ou l'état émotionnel du sujet.

L'influence des principes moteurs, est nettement moins hypothétique, que celle d'un tempo moteur spontané. Il est évident dans les travaux présentés ici que l'ajustement de la vitesse moyenne d'un point est guidé par les mêmes principes que ceux qui déterminent la vitesse d'un stylo sur une feuille. Il ne s'agit d'ailleurs pas d'une simple similarité mais très certainement de la conséquence de l'application inconsciente de ces principes dans des tâches de perception comme l'indique la corrélation des paramètres au niveau de la population (IX.2.4). Ce même résultat indique d'ailleurs, malgré les approximations dues au manque de contrôle de certaines des caractéristiques des mouvements réels, que les principes ne sont pas des principes généraux, mais bien les principes inscrits dans le système moteur de chaque sujet pris individuellement. La reconnaissance des mouvements humains ne dépend donc pas d'un module général de reconnaissance qui se serait développé par apprentissage visuel, mais bien de l'interprétation du signal visuel dans le cadre des modèles développés par le système nerveux central pour planifier et contrôler l'action.

Dans l'avant-propos, nous avons isolé un certain nombre de questions. Comment distinguons-nous les mouvements naturels des mouvements manipulés ? Comment distinguons-nous le spontané de l'exagéré, le lent du rapide ? Sur quoi ces catégories sont-elles formées ou plutôt, comment le système nerveux rend-t-il ces catégories possibles ? En d'autres termes, comment accédons-nous à l'intention derrière l'action ? Les résultats présentés dans cette recherche suggèrent que notre motricité constitue la référence permettant de formuler des jugements concernant les caractéristiques spatio-temporelles des mouvements humains.

Pour finir, nous voulons souligner que la préférence perceptive, ce choix (par exclusion d'une vitesse donnée) qui pourrait être assimilé aux aptitudes les plus complexes (choisir, juger, évaluer, décider), se révèle être fondamentalement dépendante de l'influence latente du système moteur. Dans cette situation, le sujet ne serait pas l'arbitre du choix, il en serait le théâtre. Lorsque le sujet ajuste la vitesse du point, les solutions acceptables se révéleraient à lui et, finalement, détermineraient son choix.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexander G.E., Crutcher M.D. (1990). Functional architecture of basal ganglia circuits : neural substrates of parallel processing, *Trends in Neurosciences*, 13, 266-271.
- Allman J., Miezin F. & McGuinness E. (1985). Stimulus specific responses from beyond the classical receptive field : Neurophysiological mechanisms for local-global comparison in visual neurons, *Annual Review of Neuroscience*, 8, 407-430.
- Arbib M.A. & Érdi P. (1997). *Structure, Function, and Dynamics : An integrated approach to neural organisation*, Cambridge, MA : MIT Press.
- Arbib M.A. (1981). Perception and distributed motor control, in V.D. Brooks (ed.), *Handbook of Physiology, vol II: Motor control* (p. 1449-1480), Baltimore, Williams & Wilkins.
- Bassili J.N. (1978). Facial motion in the perception of faces and of emotional expression, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 373-379.
- Beardsworth T. & Buckner T. (1981). The ability to recognize oneself from a video recording of one's movements without seeing one's body, *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8, 19-22.
- Beer R.D. (2000). Dynamical approaches to cognitive science, *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 91-99.
- Benguérel A.P. & Cowan H.A. (1974). Coarticulation of upper lip protrusion in French, *Phonetica*, 30, 41-55.
- Berardelli A., Accornero N., Argenta M., Meco G. & Manfredi M. (1986). Fast complex arm movements in Parkinson's disease, *Journal of Neurology Neurosurgery & Psychiatry*, 53, 306-313.
- Bernheimer H., Birkmayer W., Hornykiewicz O., Jellinger K. & Seitelberger F. (1973). Brain dopamine and the syndromes of Parkinson and Huntington. Clinical, morphological and neurochemical correlations, *Journal of Neurological Science*, 20, 415-55.
- Bertenthal B.I., Proffitt D.R. & Cutting, J.E. (1984). Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions, *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 213-230.
- Binder J.R., Frost J.A., Hammeke T.A., Cox R.W., Rao S.M. & Prieto T. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging, *The Journal of Neuroscience*, 17, 353-362.
- Binet A. & Courtier J. (1893). Sur la vitesse des gestes graphiques, *Revue Philosophique*, 35, 664-671.
- Bingham G.P., Schmidt R.C. & Rosenblum L.D. (1995). Dynamics and the orientation of kinematic forms in visual event recognition, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 1473-1493.
- Blakemore S-J. & Decety J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Neuroscience*, 2, 1-7.
- Bodis-Wollner I., Marx M.S., Mitra S., Bobak P., Mylin L. & Yahr M. (1987). Visual dysfunction in Parkinson's disease : Loss in spatiotemporal contrast sensitivity, *Brain*, 110, 1675-98.
- Boltz M.G. (1994). Changes in internal tempo and effects on the learning and remembering of event durations, *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 1154-1171.

- Bouvier A., George M. & Le Lionnais F. (2001). *Dictionnaire des mathématiques*, Quadrige, PUF.
- Britten K.H., Shadlen M.N., Newsome W.T. & Movshon J.A. (1992). The analysis of visual motion : A comparison of neuronal and psychophysical performance, *Journal of Neurosciences*, 12, 4745-4765.
- Brown P. (1981). An enquiry into the origins and nature of tempo behavior: II. Experimental work, *Psychology of Music*, 9, 32-43.
- Brown R.G. & Marsden C.D. (1990). Cognitive function in Parkinson's disease: from description to theory, *Trends in Neurosciences*, 13, 21-29.
- Bullier J. (2001). Integrated model of visual processing, *Brain Research Review*, 36, 96-107.
- Burt P. & Sperling G. (1981). Time, distance and feature trade-offs in visual apparent motion, *Psychological review*, 88, 171-195.
- Caminiti R., Johnson P.B. & Urbano A. (1990). Making arm movements within different parts of space: dynamic aspects in the primate motor cortex, *Journal of Neurosciences*, 10, 2039-2058.
- Carl J.R. & Gellman R.S. (1988). Human smooth pursuit : Stimulus-dependent responses, *Journal of Neurophysiology*, 57, 1446-1463.
- Chaminade T., Méary D., Orliaguet J-P. & Decety J. (2001). Is perceptual anticipation a motor simulation ? : A PET study, *NeuroReport*, 12, 3669-3674.
- Chapman H., Gavrilesco M., Wang H., Kean M., Egan G. & Castiello U. (2002). Posterior parietal cortex control of reach-to-grasp movements in humans, *European Journal of Neurosciences*, 15, 2037-43.
- Chary C., Méary D., Orliaguet J-P., David M., Moreau O. & Kandel S. (en révision). Influence of motor disorders on visual perception of human movements in a case of peripheral dysgraphia, *Neurocase*.
- Collyer C.E., Broadbent H.A. & Church R.M. (1994). Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production, *Perception and Psychophysics*, 55, 443-453.
- Crommelinck M. & Guitton D. (1994). Oculomotricité. in M. Richelle., J. Requin. & M. Robert (eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (p. 657-728). Paris PUF.
- Cutting J.E., Moore C. & Morrison R. (1988). Masking the motion of human gait, *Perception and Psychophysics*, 44, 339-347.
- Daniloff R. & Moll K. (1968). Coarticulation of lip rounding, *Journal of Speech and Hearing Research*, 11, 706-721.
- Decety J. & Jeannerod M. (1996). Mentally simulated movements in virtual reality : Does Fitts's law hold in motor imagery ? *Behavioural Brain Research*, 72, 127-134.
- Decety J. & Michel F. (1989). Comparative analysis of actual and mental movement times in two graphic tasks, *Brain and Cognition*, 11, 87-97.
- Decety J., Jeannerod M. & Prablanc P. (1989). The timing of mentally represented actions, *Behavioural Brain Research*, 34, 35-42.
- Decety J., Jeannerod M., Durozard D. & Baverel G. (1993). Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor actions, *Journal of Physiology*, 461, 549-563.
- Decety J., Jeannerod M., Germain M. & Pastene J. (1991). Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort, *Behavioural Brain Research*, 42, 1-5.

- de'Sperati C. & Viviani P. (1997). The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements, *Journal of Neuroscience*, 17, 3932-45.
- di Pellegrino G., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V. & Rizzolatti G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study, *Experimental Brain Research*, 91, 176-80.
- Dominey P., Decety J., Broussolle E., Chazot G. & Jeannerod M. (1995). Motor imagery of a lateralized sequential task is asymmetrically slowed in hemi-Parkinson patients, *Neuropsychologia*, 33, 727-741.
- Drake C., Jones M.R., & Baruch C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending, *Cognition*, 77, 251-288.
- Duffy E. (1972). Activation, in N.S. Greenfield. & R.A. Sternbach (eds.), *Handbook of psychophysiology* (p. 577-622), New-York: Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- Elliott R., Dolan R.J. & Frith C.D. (2000). Dissociable functions in the medial and lateral orbitofrontal cortex: Evidence from human neuroimaging studies, *Cerebral Cortex*, 10, 308-317.
- Fadiga L., Fogassi L., Gallese V. & Rizzolatti G. (2000). Visuomotor neurons : ambiguity of the discharge or "motor" perception ?" *International Journal of Psychophysiology*, 35, 165-177.
- Finke R.A., Freyd J.J. & Shyi G.C-W. (1986). Implied velocity and acceleration induce transformation of visual memory, *Journal of experimental Psychology: General*, 115, 175-188.
- Fitts P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fitts P.M. & Peterson J. (1964). Information capacity of discrete motor responses *Journal of Experimental Psychology*, 67, 103-112.
- Flanagan J.R. & Wing A.M. (1997). The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads, *Journal of Neurosciences*, 17, 1519-28.
- Flash T. & Hogan N. (1985). The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, *Journal of Neurosciences*, 5, 1688-703.
- Fortier P.A., Kalaska, J.F. & Smith, A.M. (1989). Cerebellar neuronal activity related to whole-arm reaching movements in the monkey, *Journal of Neurophysiology*, 62, 198-211.
- Fraisse P. (1974). Les rythmes moteurs spontanés : Tempo & balancements, in P. Fraisse (ed.), *Psychologie du rythme* (p. 43-62), Paris : PUF.
- Fraisse P. (1982). Rhythm and tempo, in D. Deutsch (ed.), *The psychology of music* (p. 149-180), Academic Press Inc: Harcourt Brace Jovanovich Publishers.
- Freyd J.J. & Finke R.A. (1984). Representational momentum, *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory, and Cognition*, 10, 126-132.
- Freyd J.J. & Finke R.A. (1985). A velocity effect for representational momentum, *Bulletin of the Psychonomic Society*, 23, 443-446.
- Freyd J.J. (1993). Representing the dynamics of a static form, *Memory and Cognition*, 11, 342-346.
- Gallese V., Fadiga L., Fogassi L. & Rizzolatti G. (1996). Action recognition in the premotor cortex, *Brain*, 119, 593-609.
- Gallese V., & Goldman A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading, *Trends in Cognitive Neurosciences*, 2, 493-501.

- Gazzaniga M.S., Ivry R.B. & Mangun G.R. (1998). *Neurosciences Cognitives. La biologie de l'esprit*, DeBoeck Université.
- Georgopoulos A.P. (1991). Higher order motor control, *Annual Review of Neurosciences*, 14, 361-77.
- Georgopoulos A.P., Ashe J., Smyrnis N. & Taira M. (1992). The motor cortex and the coding of force, *Science*, 256, 1692-5.
- Georgopoulos A.P. & Massey, J.T. (1987), Cognitive spatial-motor processes 1. The making of movements at various angles from a stimulus direction ; *Experimental Brain Research*, 65, 361-370.
- Georgopoulos A.P., Lurito J.T., Petrides M., Schwartz A.B. & Massey J.T. (1989). Mental rotation of the neuronal population vector, *Science*, 243, 234-6.
- Georgopoulos A.P. & Pellizzer G. (1995). The mental and the neural: psychological and neural study of mental rotation and memory scanning, *Neuropsychologia*, 11, 1531-1547.
- Gérard C. & Rosenfeld M. (1995). Pratique musicale & régulations temporelles, *L'Année Psychologique*, 95, 571-591.
- Gibbon J., Malapani C., Dale C.L. & Gallistel, C.R. (1997). Toward a neurobiology of temporal cognition: advances and challenges, *Current Opinion in Neurobiology*, 7, 170–184.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*, Boston : Houghton Mifflin.
- Gièse M.A. & Lappe M. (preprint, 2003). Measurement of generalization fields for the recognition of biological motion.
- Glickstein M. (2000). How are visual areas of the brain connected to motor areas for the sensory guidance of movement ? *Trends in Neurosciences*, 23, 613-617.
- Goodale M.A. & Milner A.D. (1992). Separate visual pathways for perception and action, *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- Goodale M.A., Milner A.D., Jakobson, L.S. & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them, *Nature*, 349, 154-156.
- Grèzes J. & Decety J. (2001). Functional anatomy of execution, mental simulation, observation, and verb generation of actions: a meta-analysis, *Human Brain Mapping*, 12, 1-19.
- Grossman E.D., Blake R. (1999). Perception of coherent motion, biological motion and form-from-motion under dim-light conditions, *Vision Research*, 39, 3721-3727.
- Grossman E.D., Blake R. (2001). Brain activity evoked by inverted and imagined biological motion, *Vision Research*, 41, 1475-1482.
- Grossman E.D., Donnelly M., Price R., Pickens D., Morgan V., Neighbor G. & Blake R. (2000). Brains areas involved in perception of biological motion, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 711-720.
- Grush R. (preprint, 2003). The emulation theory of representation: motor control, imagery, and perception.
- Harris C.M. & Wolpert D.M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning, *Nature*, 394, 780-784.
- Haruno M., Wolpert D.M. & Kawato, M. (2001). MOSAIC model for sensorimotor learning and control, *Neural Computation*, 13, 2201-2220.
- Hazeltine E., Helmuth L.L. & Ivry R. (1997). Neural Mechanisms of Timing, *Trends in Cognitive Sciences*, 1, 163-169.

- Heptulla-Chatterjee S., Freyd J.J., Shiffrar M. (1996). Configural processing in the perception of apparent biological motion, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 916-29.
- Hollerbach M.J. & Flash T. (1982). Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement, *Biological Cybernetics*, 44, 67-77.
- Hommel B., Müsseler J., Aschersleben G. & Prinz W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): A Framework for Perception and Action Planning, *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.
- Iwanaga M. & Tsukamoto M. (1998). Preference for musical tempo involving systematic variations of presented tempi for known and unknown musical excerpts, *Perceptual and Motor Skills*, 86, 31-41.
- Iwanaga M. (1995a). Harmonic relationship between preferred tempi and heart rate, *Perceptual and Motor Skills*, 81, 67-71.
- Iwanaga M. (1995b). Relationship between heart rate and preference for tempo of music. *Perceptual and Motor Skills*, 81, 435-440.
- Jacob A. (1990) *Encyclopédie Philosophique Universelle*, Tome 1-2, PUF, Paris.
- Jeannerod M. (1984). The timing of natural prehension movements, *Journal of Motor Behavior*, 16, 235-254.
- Jeannerod M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery, *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2), 187-245.
- Jeannerod M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition, *Neuroimage*, 14, 103-109.
- Jeannerod M., Arbib M.A., Rizzolatti G. & Sakata H. (1995). Grasping objects : The cortical mechanisms of visuomotor transformation, *Trends in Neurosciences*, 18, 314-320.
- Jeannerod M. & Decety J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action, *Current Opinion in Neurobiology*, 5, 727-732.
- Jeannerod M. & Frak V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans, *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 735-739.
- Johansson G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis, *Perception and Psychophysics*, 14, 201-211.
- Johansson G. (1975). Visual motion perception, *Scientific American*, 232, 76-88.
- Johansson G. (1976). Spatio-temporal differentiation and integration in visual motion perception, *Psychological Research*, 38, 379-393.
- Jordan S.J., Stork S., Knuf L., Kerzel D. & Müsseler J. (2002). Action planning affects spatial localization, in W. Prinz. & B. Hommel (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 158-176), NY: Oxford University Press.
- Jueptner M., Rijntjes M., Weiller C., Faiss J.H., Timmann D., Mueller S.P. & Diener H.C. (1995). Localization of a cerebellar timing process using PET, *Neurology*, 45, 1540-5.
- Kalaska J.F. (1988). The representation of arm movements in postcentral and parietal cortex, *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 66, 455-463.
- Kandel S., Orliaguet J-P. & Boë L.J. (2000). Detecting anticipatory events in handwriting movements, *Perception*, 29, 953-964.
- Kandel S., Orliaguet J-P. & Viviani P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting: The role of implicit motor competence, *Perception & Psychophysics*, 62, 706-716.

- Kim J-N. & Shadlen M.N. (1999). Neural correlates of a decision in the dorsolateral prefrontal cortex of the macaque, *Nature Neurosciences*, 2, 176-185.
- Kimura M. (1980). La théorie neutraliste de l'évolution moléculaire, *Pour la science*, 27, 48.
- Kikkawa M. (1978). Performance and time of day : diurnal variations in physiological and psychological tests, *Journal of Child Development*, 14, 16-24.
- Kirby R.L., Carr S.E., MacLeod D.A. (1990). Cardiac-locomotor coupling while finger tapping, *Perceptual and Motor Skills*, 71, 1099-1104.
- Kir-Stimon, W. (1977). Tempo-statis as a factor in psychotherapy: individual tempo and life rhythm, temporal territoriality, time planes, and communication, *Psychotherapy: Theory, Research, and Practice*, 14, 245-248.
- Knoblich G., Seigerschmidt E., Flach R. & Prinz W. (2002). Autorship effects in the prediction of handwriting strokes: Evidence for action simulation during action perception, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55, 1027-1046.
- Koller W.C., Pahwa R., Lyons K.E. & Albanese A. (1999). Surgical treatment of Parkinson's disease, *Journal of the Neurological Sciences*, 67, 1-10.
- Kozlowski L.T. & Cutting J.E. (1977). Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display, *Perception and Psychophysics*, 21, 575-580.
- Kumai M. & Sugai K. (1997). Relation between synchronized and self-paced response in preschoolers' rhythmic movement, *Perceptual and Motor Skills*, 85, 1327-1337.
- Lacquaniti F., Terzuolo C.A. & Viviani P. (1983). The law relating kinematic and figural aspects of drawing movement, *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Lapidaki E. & Webster P.R. (1991). Consistency of tempo judgments when listening to music of different styles, *Psychomusicology*, 10, 1, 19-30.
- Lejeune H. & Macar F. (1994). Régulations temporelles, in M. Richelle., J. Requin. & M. Robert (eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (p. 859-924), Paris : PUF.
- Leung H-C. & Kettner R.E. (1996). Predictive smooth pursuit of complex two-dimensional trajectories demonstrated by perturbation responses in monkeys, *Vision Research*, 37, 1347-1354.
- Limousin P., Krack P., Pollak P., Benazzouz A., Ardouin C., Hoffmann D., Benabid A-L. (1998). Electrical stimulation of the sub-thalamic nucleus in advanced Parkinson's disease, *The New England Journal of Medicine*, 339, 1105-1111.
- Louis-Dam A., Orliaguet J-P., & Coello, Y. (1999). Perceptual anticipation in grasping movement : When does it become possible, in M.A. Grealy. & J.A. Thomson (eds), *Studies in perception and action V* (p. 135-139), Edinburgh: Lawrence Erlbaum Associate.
- Malapani C., Rakitin B., Levy R., Meck WH., Deweer B., Dubois B. & Gibbon J. (1998). Coupled temporal memories in Parkinson's disease: a dopamine-related dysfunction, *Journal of Cognitive Neurosciences*, 10, 316-31.
- Mather G. & West S. (1993). Recognition of animal locomotion from dynamic point-light displays, *Perception*, 22, 759-766.
- Maunsell J.H.R. & Van Essen, D.C. (1983). Functionnal properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. 1. Selectivity for stimulus direction, speed and orientation, *Journal of Neurophysiology*, 49, 1127-1147.
- Meck, W.H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception, *Cognitive Brain Research*, 3, 227-242.

- Mendèz E., Sabaté M., Garcia-Baez P., Santana C. & Rodriguez M. (1998). Time resolution for visual information processing in Parkinson's disease, *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 65, 921-923.
- Meyer D.E., Smith J.E.K., Kornblum S., Abrams R.A. & Wright C.E. (1990). Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements : Toward a theory of rapid voluntary action, in M. Jeannerod (ed.), *Attention and performance XIII* (pp. 173-226), Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum.
- Michel F. (1971). Étude expérimentale de la vitesse du geste graphique, *Neuropsychologia*, 9, 1-13.
- Mink J.W. (1996). The basal ganglia: focused selection and inhibition of competing motor programs, *Progress in Neurobiology*, 50, 381-425.
- Mishima J. (1965). The psycho-physiological factors of the mental tempo. *Journal of Child Development*, 1, 1-11.
- Mishima J. (1968). On the measurement of the mental tempo, *Journal of Child Development*, 4, 55-63.
- Moelants D. (2002). Preferred tempo reconsidered, in C. Stevens., D. Burnham., G. McPherson., E. Schubert. & J. Renwick (eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Music Perception and Cognition* (p. 580-583), Adelaide: Causal Productions.
- Müller F. & Stelmach G.E. (1992). Prehension Movements in Parkinson's disease, in G.E. Stelmach & J. Requin (eds.), *Tutorials in motor behavior II* (p. 307-319), North-Holland.
- Neri P., Morrone M.C. & Burr D.C. (1998). Seeing biological motion, *Nature*, 395, 894-896.
- Newsome W.T. & Pare E.B. (1988). A selective impairment of motion processing following lesions of the middle temporal visual area (MT), *Journal of Neurosciences*, 8, 2201-2211.
- Norman J. (preprint, 2003). Two visual systems and two theories of perception: An attempt to reconcile the constructivist and ecological approaches, *Behavioral and Brain Science*, 24, xxx-xxx.
- Obeso J.A., Rodríguez-Oroz M.C., Rodríguez M., Lanciego J.L., Artieda J., Gonzalo N., Olanow C.W. (2000). Pathophysiology of the basal ganglia in Parkinson's disease, *Trends in Neurosciences (Suppl)*, 23, 8-19.
- O'Boyle D.J., Freeman J.S. & Cody F.W. (1996). The accuracy and precision of timing of self-paced, repetitive movements in subjects with Parkinson's disease, *Brain*, 119, 51-70.
- Oléron G., Fraisse P., Siffre M. & Zuili N. (1970). Les variations circadiennes du temps de réaction et du tempo spontané au cours d'une expérience « hors du temps », *L'année Psychologique*, 70, 347-356.
- Oram M.W. & Perrett D.I. (1994). Responses of anterior superior temporal polysensory (STPa) neurons to "biological motion" stimuli. *Journal of Cognitive Neurosciences*, 6, 99-116.
- O'Regan J.K. & Noë A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness, *Behavioral and Brain Sciences* 24, 111-134
- Orliaguet J.P. & Boë L.J. (1990). Régulation temporelle des mouvements d'écriture en fonction des contraintes spatiales, in V. Nougier & J.P. Blanchi (eds.), *Pratiques sportives & modélisation du geste* (p. 163-177), Grenoble : Collection Grenoble Sciences.

- Orliaguet J.P., Kandel S. & Boë J.L. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting : Influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters, *Perception*, 26, 905-912.
- Paillard J. (1994). L'intégration sensori-motrice et ideo-motrice, in M. Richelle., J. Requin. & M. Robert (eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (p. 926-927), Paris : PUF
- Papaxanthis C., Pozzo T., Popov K.E. & McIntyre J. (1998). Hand trajectories of vertical arm movements in one-G and zero-G environments : Evidence for a central representation of gravitational force, *Experimental Brain Research*, 120, 496-502.
- Papaxanthis C., Pozzo T., Vinter A. & Grishin A. (1998). The representation of gravitational force during drawing movements of the arm, *Experimental Brain Research*, 120, 233-42.
- Pastor MA, Artieda J, Jahanshahi M, Obeso JA. (1992). Time estimation and reproduction is abnormal in Parkinson's disease, *Brain*, 115, 211-255.
- Pavlova M., Krägeloh-Mann I., Sokolov A., & Birbaumer N. (2001). Recognition of point-light biological motion displays by young children, *Perception*, 30, 925-933.
- Perenin M.T. & Vighetto A. (1988). Optic ataxia : a specific disruption in visuomotor mechanisms. I. Different aspects of the deficits in reaching for objects, *Brain*, 111, 643-674.
- Perilli G.G. (1995). Subjective tempo in adults with and without psychiatric disorders, *Music Therapy Perspectives*, 13, 2, 104-109.
- Perret D.I., Mistlin A.J., Harries, M.H. & Chitty, A.J. (1990). Understanding the visual appearance and conséquences of hand actions, in M.A. Goodale (ed.), *Vision and action: the control of grasping* (p. 163-180), Norwood, NJ, Ablex.
- Perrone J.A. & Thiele A. (2001). Speed skills : measuring the visual speed analysing properties of primate MT neurons, *Nature Neuroscience*, 4, 526-532.
- Perrone J.A. & Thiele A. (2002). A model of speed tuning in MT neurons, *Vision Research*, 42, 1035-1051.
- Petitot J., Varella F.J., Pachoud B. & Roy J.M. (1999). *Naturalizing Phenomenology: Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science*, Stanford University Press.
- Plamondon R. (1992). A theory of rapid movements, in J.E. Stelmach & J. Requin (eds.), *Tutorial in motor behavior II* (p. 55-69), Elsevier, North-Holland.
- Plamondon R. & Alimi A.M. (1997). Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements, *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 279-349.
- Poizner H., Bellugi U., & Lutes-Driscoll V. (1981). Perception of American Sign Language in dynamic point-light displays, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 430-440.
- Pozzo T., Papaxanthis C., Stapley P. & Berthoz A. (1998). The sensorimotor and cognitive integration of gravity, *Brain Research Review*, 28, 92-101.
- Prinz W. & Hommel B. (2002), Common mechanisms in perception and action: Introductory remarks, in W. Prinz. & B. Hommel (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 1-3), NY: Oxford University Press.
- Proust J. (2000). Pour une théorie "motrice" de la simulation, *Psychologie Française*, 45, 295-306.

- Ransmayr G., Schmidhuber-Eiler B., Karamat E., Engler-Plorer S., Poewe W. & Leidlmaier K. (1987). Visuoception and visuospatial and visuorotational performance in Parkinson's disease, *Journal of Neurology*, 235, 99-101.
- Reilly T., Atkinson G. & Waterhouse J. (1997). *Biological rhythms and exercise*. Oxford University Press : Oxford.
- Reisbeck T.E. & Gegenfurtner K.R. (1999). Velocity tuned mechanisms in human motion processing, *Vision Research*, 39, 3267-3285.
- Rossetti Y. & Pisella L. (2002). Several 'vision for action' systems: a guide to dissociating and integrating dorsal and ventral functions (Tutorial), in W. Prinz. & B. Hommel (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 62-119), NY: Oxford University Press.
- Roth N., Wünderlich B. & Pöggel B. (1985). Development of psychomotor tempo and EEG alpha frequency in seven to fifteen years old children, *Activitas Nervosa Superior* (Suppl), Vol. 27, 169-178.
- Rumelhart D.E. & Norman D.A. (1982). Simulating skilled typist: A study of skilled cognitive-motor performance, *Cognitive Science*, 6, 1-36.
- Runeson S. & Frykholm G. (1981). Visual perception of lifted weight, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 733-740.
- Runeson S. & Frykholm G. (1983). Kinematic specification of dynamics as an informational basis for person-and-action perception: expectation, gender, recognition and deceptive intention, *Journal of Experimental Psychology: General*, 112, 585-615.
- Runeson S. (1974). Constant velocity - not perceived as such, *Psychological Research*, 37, 3-23.
- Sakata H. & Taira M. (1994). Parietal control of hand action, *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 847-856.
- Schwartz A.B. (1994). Direct cortical representation of drawing, *Science*, 265, 540-2.
- Seghier M., Dojat M., Delon-Martin C., Rubin C., Warnking J., Segebarth C. & Bullier J. (2000). Moving illusory contours activate primary visual cortex: an fMRI study, *Cerebral Cortex*, 10, 663-670.
- Shiffrar M. & Freyd J.J. (1990). Apparent motion of the human body, *Psychological Science*, 1, 257-264.
- Shiffrar M. & Freyd J.J. (1993). Timing and apparent motion path choice with human body photographs, *Psychological Science*, 4 (6), 379-384.
- Shiffrar M. (1994). When what meets where, *Current Directions in Psychological Science*, 3, 96-100.
- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2000). Le rôle du cortex pariétal dans la représentation des mouvements manuels, *Psychologie Française*, 45, 343-351.
- Snowden R.J. & Braddick O.J. (1991). The temporal integration and resolution of velocity signals, *Vision Research*, 31, 321-326.
- Soechting J.F. & Terzuolo C. (1986). An algorithm for the generation of curvilinear wrist motion in an arbitrary plane in three-dimensional space, *Neuroscience*, 23, 53-61.
- Stelmach G.E. & Castiello U. (1992). Functional force control in Parkinson's disease patients, in G.E. Stelmach & J. Requin (eds.), *Tutorials in motor behavior II* (p. 401-424), Elsevier, North-Holland.
- Stevens J.A., Fonlupt P., Shiffrar M. & Decety J. (1999). New aspect in motion perception: selective neural encoding of apparent human movements, *Neuroreport*, 11, 109-115.

- Stoet G. & Hommel B. (2002). Interaction between feature binding in perception and action, in W. Prinz. & B. Hommel. (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 538-537), NY: Oxford University Press.
- Sumi S. (1984). Upside down presentation of the Johansson moving light spot pattern, *Perception*, 13, 283-286.
- Temperley N.M. (1963). Personal tempo and subjective accentuation. *Journal of General Psychology*, 78, 267-287.
- Thobois S., Dominey P.F., Decety J., Pollak P., Gregoire M.C., Le Bars D. & Broussolle E. (2000). Motor imagery in normal subjects and in Parkinson's disease: A PET study, *Neurology*, 55, 996-1002.
- Thobois S., Dominey P., Fraix V., Mertens P., Guenot M., Zimmer L., Pollak P., Benabid A-M. & Broussolle E. (2002), Effects of subthalamic nucleus stimulation on actual and imagined movement in Parkinson's disease: a PET study, *Journal of Neurology*, 249, 1-10.
- Thomassen A.J.W.M. & Schomaker L.R. (1986). Between-letter context effects in handwriting trajectories, in H.S. Kao., G.P. van Galen. & R. Hoosain (eds.), *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting* (p. 253-272), Amsterdam: Elsevier.
- Thompson E. & Varela F.J. (2001). Radical embodiment: neural dynamics and consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 418-425.
- Thorpe S., Fize D., Marlot C. (1996). Speed of processing in the human visual system, *Nature*, 381, 520-522.
- Tremblay L. & Schultz W. (1999). Relative reward preference in primate orbitofrontal cortex, *Nature*, 398, 704-707.
- Ungerleider L. & Mishkin M. (1982) Two cortical visual systems, in D.J. Ingle., M.A. Goodale. & R.J.W. Mansfield (eds.), *Analysis of motor behavior* (p. 549-586), Cambridge, MA : MIT Press.
- Uno Y., Kawato M. & Suzuki R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human arm movement: minimum torque-change model, *Biological Cybernetics*, 61, 89-101.
- van Essen D.C. & Maunsell J.H.R. (1983). Hierarchical organization and functional streams in the visual cortex, *Trends in Neuroscience*, 6, 370-375.
- van Galen G.P. & van Huygevoort M. (2000). Error, stress and the role of neuromotor noise in space oriented behaviour, *Biological Psychology*, 51, 151-71.
- van Galen G.P., van Muelenbroek R.G.J. & Hylkema H. (1986). On the simultaneous processing of words, letters and strokes in writing: Evidence for a mixed linear and parallel model, in H.S. Kao., G.P. van Galen. & R. Hoosain (eds.), *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting* (p. 5-20), Amsterdam: Elsevier.
- Vanneste S., Pouthas V. & Wearden J.H. (2001). Temporal control of rhythmic performance : a comparison between young and old adults, *Experimental Aging Research*, 27, 83-102.
- Vinter A. & Mounoud P. (1991), Isochrony and accuracy of drawing movements in children : effects of age and context, in J. Wann., A. Wing. & N. Sovik (eds.), *Development of graphic skills* (p. 113-134), New-York ; Academic Press.
- Viviani P. (1994). Les habiletés motrices, in M. Richelle., J. Requin. & M. Robert (eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (p. 777-857), Paris : PUF.
- Viviani P. & Flash T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 32-53.

- Viviani P. (1998). La dynamique de la perception, in *Science & Vie, Hors série*, 204, 122-132.
- Viviani P. (2002). Motor competence in the perception of dynamic events: a tutorial, in W. Prinz. & B. Hommel (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 406-442), NY: Oxford University Press.
- Viviani P., Baud-Bovy G. & Redolfi M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli: further evidence of motor- perceptual interactions, *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23, 1232-52.
- Viviani P., Campadelli P. & Mounoud P. (1987). Visuo-manual pursuit tracking of human two-dimensional movements, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 62-78.
- Viviani P. & McCollum G. (1983). The relation between linear extent and velocity in drawing movements, *Neuroscience*, 10, 211-8.
- Viviani P. & Schneider R. (1991). A developmental study of the relationship between geometry and kinematics in drawing movements, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 198-218.
- Viviani P. & Stucchi N. (1989). The effect of movement velocity on form perception : Geometric illusions in dynamic displays, *Perception & Psychophysics*, 46, 266-274.
- Viviani P. & Stucchi N. (1992a). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 603-23.
- Viviani P. & Stucchi N. (1992b). Motor-perceptual interactions, in G.E. Stelmach & J. Requin (eds), *Tutorials in Motor Behavior II* (p. 229-248), Amsterdam : North-Holland.
- Viviani P., & Terzuolo C. (1982). Trajectory determines movement dynamics, *Neuroscience*, 7, 431-7.
- Wann J.P., Nimmo-Smith J. & Wing, A.M. (1988). Relation between velocity and curvature in movement: Equivalence and divergence between a power law and a minimum-jerk model, *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 14, 622-637.
- Wehner T., Vogt S. & Stadler M. (1984). Task-specific EMG characteristics during mental training, *Psychological Research*, 46, 389-401.
- Wilson R.A. & Keil F.C. (1999). *The MIT encyclopedia of the Cognitive Sciences*, MIT Press.
- Wing A.M. & Beek P.J. (2002). Movement timing: a tutorial, in W. Prinz. & B. Hommel (eds.), *Attention and performance XIX: Common mechanisms in perception and action* (p. 406-442), NY: Oxford University Press.
- Wolpert D.M., Doya K. & Kawato M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 358, 593-602.
- Wolpert D.M. & Ghahramani Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience, *Nature Neuroscience (suppl)*, 3, 1212-1217.
- Wolpert D.M. & Kawato M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control, *Neural Networks*, 11, 1317-1329.
- Wolpert D.M., Miall, R.C. & Kawato M. (1998). Internal models in the cerebellum, *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 338-347.
- Zihl J., von Cramon D. & Mai N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage, *Brain*, 106, 313-340.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. (d'après Rossetti & Pisella, 2001). Vision schématique d'ensemble des aires impliquées dans les transformations visuo-motrice chez le singe macaque.....	5
Figure 2. Représentation temps /espace de la sensibilité de quatre neurones de MT.....	11
Figure 3. Distribution de la population de 84 neurones testée dans l'expérience de Perrone & Thiele, (2001).....	12
Figure 4. Représentation schématique des stimuli présentés par Shiffrar et Freyd (1990), empruntée à Viviani (1998).....	42
Figure 5. Stimuli utilisés dans l'expérience de Seghier et collaborateurs (2000).....	45
Figure 6. D'après Hommel et collaborateurs, 2001. A) Codage des traits. B) Intégration de codes de traits en représentation de l'événement.....	75
Figure 7. D'après Viviani, (2001). Deux ensembles d'oscillateurs, hiérarchiquement organisés contribuent à la genèse des percepts et à l'organisation des actions.....	81
Figure 8. Trajectoire et profil de vitesse tangentielle des stimuli présentés dans les trois conditions expérimentales.....	94
Figure 9. Mesure du débit sanguin cérébral.....	98
Figure 10. A) Forme, et ,B) profil de vitesse tangentielle du stimulus.....	108
Figure 11. Vue schématique de la situation expérimentale.....	109
Figure 12. Description des résultats individuels.....	112
Figure 13. Répartition des 912 Pf « préférées ».....	113
Figure 14. A) Répartition de la population en fonction du nombre de captures. B) Les captures se produisent même lorsque la valeur P_i présentée correspond à une vitesse éloignée de la tendance centrale du sujet.....	116
Figure 15. Représentation du phénomène d'attraction.....	117
Figure 16. Répartition des 103 valeurs moyennes de Pf.....	119
Figure 17. Répartition des coefficients de variation de la population testée ($n = 103$).	119
Figure 18. Pf moyennes pour les 4 groupes et coefficients de variation	128
Figure 19. Trajectoires (A et C) et profils de vitesse tangentielle (B et D) du point dans les conditions ellipse et pointage.....	135
Figure 20. Dans cette expérience, la période ajustée sur l'écran (A) et le temps de mouvement (B) sont estimés.....	136
Figure 21. Analyse de la production motrice.....	138
Figure 22. Moyennes et écarts types des valeurs de Pf en fonction de la longueur de la trajectoire.....	141
Figure 23. Résultats individuels, en perception et en production pour les trois types de mouvements testés.	143
Figure 24. Paramètres de la régression pour la perception (carrés transparents) et la production (carrés noirs).....	144
Figure 25. Effets d'interaction entre le facteur modalité (perception, production) et le facteur ordre (per, pro).....	147
Figure 26. Corrélation des paramètres g (triangles) et $\log P_o$ (cercles) pour le groupe de sujets ayant commencé par la production (A : Ordre Pro) et pour le groupe ayant commencé par la perception (B : Ordre Per).....	148

Figure 27. Exemple de modèles utilisés pour contrôler la variabilité spatiale des mouvements de traçage.	152
Figure 28. Durée moyenne d'un cycle d'un mouvement de traçage d'ellipse en fonction de la variabilité spatiale tolérée et de la longueur de la trajectoire.	154
Figure 29. Représentation de l'effet de la longueur de la trajectoire sur le temps de mouvement.	155
Figure 30. Moyenne des paramètres de la régression de Pf et l, pour la perception d'ellipses.	161
Figure 31. Vue moderne des boucles motrices des ganglions de la base (d'après Obeso, Rodríguez-Oroz, Rodríguez, Lanciego, Artieda, Gonzalo & Olanow, 2000).	169
Figure 32. Illustration des troubles moteurs dans la maladie de Parkinson.	179
Figure 33. Description des profils de vitesse tangentielle en utilisant une transformée de Fourier. Le signal original (figure 32, B et D) est décomposé en fonctions sinusoïdales sous-jacentes de longueurs d'ondes particulières.	180
Figure 34. Illustration des troubles moteurs dans la maladie de Parkinson.	182
Figure 35. Relations entre la longueur de la trajectoire (axe x log, l en cm) et la période exécutée ou choisie par les sujets (axe y log, Pf en s) dans le cas du traçage d'ellipses.	183
Figure 36. Relations entre la longueur de la trajectoire (axe x log, l en cm) et la période exécutée ou choisie par les sujets (axe y log, Pf en s) dans le cas des mouvements de pointage.	185
<hr/>	
Tableau 1. Régions où le débit sanguin cérébral est particulièrement important.	99
Tableau 2. Régions où le débit sanguin cérébral est particulièrement important dans les situations AE et AP révélées par les contrastes AE-AO et AP-AO.	99
Tableau 3. Paramètres des régressions de puissance de Pf et l pour le traçage d'ellipses. Un effet de la L-dopa sur les tempos choisis en perception apparaît clairement.	184
Tableau 4. Paramètres des régressions de puissance de Pf et l pour les mouvements de pointage.	185

INDEX DES TERMES

Attracteur. Un attracteur est une position préférée par un système, de telle sorte que partant d'un état initial déterminé, le système évolue jusqu'à ce qu'il parvienne à l'attracteur. L'attracteur peut être un point (le centre d'un bol contenant une balle), une trajectoire (orbite planétaire), un ensemble complexe d'états (le métabolisme d'une cellule) ou une séquence infinie d'états (attracteur étrange). Ces attracteurs définissent les états possible pour le système, c'est-à-dire une portion de l'espace des phases du système (compression). La portion de l'espace des phases qui converge vers l'attracteur est appelé bassin d'attraction et comprend toute les pré-images de l'attracteur. Le ratio entre le volume du bassin et le volume de l'attracteur peut être une mesure du degré d'auto organisation présente dans le système.

Chaos, chaotique : Relatif à la théorie mathématique du chaos (Bouvier et al, 2001). Dès 1899, H. Poincaré émettait l'hypothèse que d'infimes incertitudes sur l'état initial d'un système sont amplifiées au cours du temps, de sorte qu'il est impossible de prévoir l'évolution du système à long terme. A partir des années 60, de nombreux scientifiques ont repris cette hypothèse. Avec l'aide prépondérante de l'ordinateur, l'étude mathématique de certains systèmes dynamiques d'équations a permis de simuler des phénomènes dynamiques, qui vont à l'encontre de l'opinion de nombreux scientifiques qui pensaient, avant E. Lorentz, que des causes simples entraînent des effets simples. La solution de tels systèmes est attirée par un attracteur étrange géométriquement très complexe (objet fractal) et l'évolution de la solution vers cet attracteur à un comportement erratique imprévisible. De plus, cette solution est très sensible aux conditions initiales : d'infimes modifications de ces dernières provoquent une évolution très différente de la solution vers l'attracteur. On dit que le comportement de la solution est chaotique ou que le système engendre le chaos. Ce chaos, qui reflète le manque d'information sur l'attracteur et sur l'évolution de la solution, est néanmoins déterministe puisque engendré par un système d'équations parfaitement connu. L'étude du chaos, en plein essor actuellement, s'appuie à la fois sur des théories mathématiques et sur les observations de simulation en laboratoire. Cette étude intéresse pratiquement toutes les disciplines scientifiques (physique, chimie, géologie, économie, sociologie, psychologie...).

Complexité : La complexité est un concept difficile à définir. Les mathématiques distinguent deux concepts dans l'idée de complexité. La complexité aléatoire qui correspond à la formulation la plus simple d'un objet (la taille minimale de l'algorithme pouvant le décrire) et la complexité organisée (ou profondeur logique) qui correspond au temps de calcul de l'algorithme minimal décrivant cet objet. Cette distinction peut être intuitivement abordée au niveau des systèmes à travers les concepts de complexité statique et de complexité dynamique. La complexité statique décrit la structure d'un système, d'un objet, et la complexité dynamique exprime le temps et la quantité de ressources nécessaire pour décrire l'information contenue dans un objet ou l'état d'un système. La complexité dynamique n'est pas assimilable à la complexité calculatoire d'un problème qui est estimée par le temps nécessaire à un ordinateur disposant de ressources données pour résoudre ce problème. Cette dernière en effet nécessite une connaissance à priori des paramètres du problème et ce rapproche en cela de la complexité organisée décrite plus haut. La complexité statique n'est pas nécessaire à l'apparition de la complexité dynamique. Un système peut être structurellement simple

et avoir un comportement dynamique complexe (fluides). Dans le cas du système nerveux central, il est évident que les deux mesures permettent de le caractériser comme un système complexe.

Conscience. Connaissance intuitive, immédiate, que l'être humain possède de son existence, de ses facultés, de ses actes. Les concepts, les idées, les manifestations de la volonté sont les expressions les plus élaborées de la conscience psychologique. Les états de conscience sont constitués d'un ensemble de pensées, d'émotions, de sentiments, d'images, qui se succèdent en nous et constituent notre vie mentale. Si la conscience est toujours conscience de quelque chose, si elle est caractérisée par une intentionnalité, comme le propose la phénoménologie, elle est aussi un redoublement réflexif par lequel le sujet se sait percevant. De cette conscience naît le sentiment de l'unité du moi à travers la multiplicité du perçu. Dans cette définition, nous retrouvons la nuance proposée par O'Regan et Noë, (2001) entre la conscience transitive de quelque chose de particulier et la conscience d'être capable de pouvoir devenir transitivement conscient des caractéristiques de la scène.

Dynamique : Branche de la mécanique qui étudie le mouvement d'un mobile en relation avec ses causes et introduit la notion de force. Le principe de la proportionnalité de la force à l'accélération dans le cas du point matériel et les extensions qu'on peut en faire à des systèmes plus généraux ramènent la plupart des problèmes de dynamique à la résolution d'un système d'équations différentielles. De façon générale, on appelle système dynamique un processus d'évolution temporelle dans lequel le futur dépend d'une manière déterministe du passé. La donnée des valeurs initiales du système détermine les valeurs au temps (t). Toutefois, c'est en étudiant, pour certains systèmes dynamiques, l'évolution des valeurs du système que furent mis en évidence, à l'aide de l'ordinateur, l'existence d'attracteurs étranges et le comportement chaotique des valeurs qu'ils attirent. De tel systèmes dynamiques échappent ainsi partiellement au déterminisme initialement inscrit dans les valeurs des paramètres de équations qui définissent initialement le système (voir *chaos*).

Émergence : Le terme émergence désigne l'apparition de propriétés ou de comportements d'un « niveau supérieur » au sein d'un système. Ces propriétés ou comportements qui résultent de la dynamique du système ne peuvent être déduits des propriétés des éléments de bas niveau qui constituent le système. Les propriétés émergentes sont les propriétés de la totalité. Ainsi, l'émergence fait référence à un processus par lequel un système d'éléments en interaction se dote de nouvelles caractéristiques qui ne peuvent être expliquées comme une somme de propriétés des éléments constituant le système (une molécule d'air n'est pas une tornade, un neurone n'est pas conscient).

Subjectivité : État ou qualité de ce qui est subjectif, au deux principaux sens de l'adjectif, qui peut signifier soit « appartenant à la pensée humaine » soit « appartenant à la conscience individuelle ». Dans la philosophie moderne la subjectivité tend plus précisément à désigner la *conscience de soi* pensée comme ce qui est le plus essentiel en l'homme. Pris dans un sens trop personnel la subjectivité est présentée parfois comme un obstacle à l'objectivité alors qu'en toute rigueur elle en est au contraire la condition de possibilité. Car de même qu'il n'est d'objet connu que pour une pensée qui le conçoit, de même l'objectivité présuppose t'elle l'existence d'une subjectivité qui la pense.

Système : Rassemblement d'objets, d'éléments ou de part d'une réalité qu'il convient de saisir dans leur articulation réciproque. Par cette articulation chacun des éléments acquiert signification de la place qu'il occupe dans ce tout. La relation en cause est alors exactement définie : ces éléments ne sont pas seulement juxtaposés, mais rapportés les uns aux autres selon l'ordre d'une interdépendance. Système peut avoir une signification statique ou dynamique, et les champs d'application de ce concept sont des plus divers. Mais la nuance qui s'attache le plus communément à son usage est celle d'une fermeture, ainsi que d'une prévalence de la dimension théorique et parfaitement définie sur la plasticité qui semble requise pour l'expérience concrète. Un système c'est donc tout d'abord un ensemble de relations ou de normes qui s'imposent comme telles dans leur figure achevée, qu'il s'agisse d'une référence conventionnelles (système métrique), d'une représentation qui cherche à rendre compte d'un équilibre cosmique (système solaire) ou d'un fonctionnement biologique (système nerveux), d'une théorie globale susceptible de rendre compte de l'ensemble des phénomènes (système de la relativité d'Einstein) ou encore, d'une construction rationnelle qui détermine le fonctionnement d'un discours (système de pensée). Nous emploierons système dans le sens de représentation d'un fonctionnement biologique. Le système nerveux central sera considéré comme un système *complexe*.

ANNEXES

ANNEXE 1

Analyse de la préférence perceptive pour la vitesse

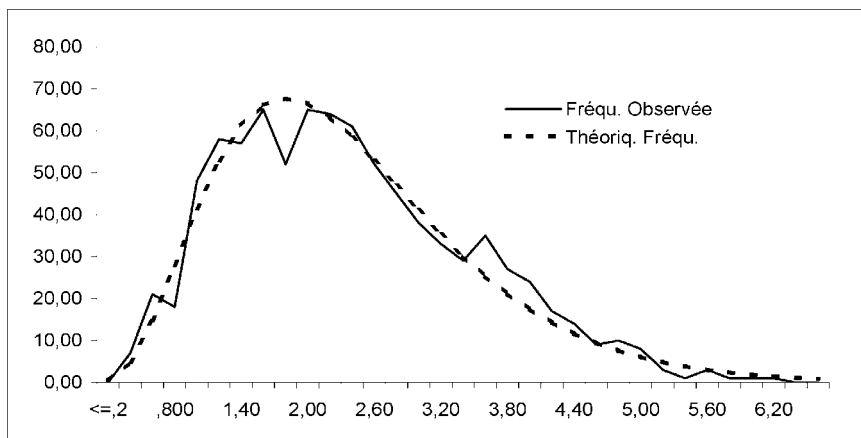
Statistiques descriptives de la distribution Globale après filtrage des 2,5 % extrêmes.

Variable Pf ; distribution: Gamma n intervalles Min Max Echelle Forme
34,00 0,00 6,80 0,57 3,94

Kolmogorov-Smirnov d = ,0219097, p = n.s.

Chi² : 30,65223, dl = 24, p = ,1641907 (dl ajustés)

Classes	Fréq. Observée	Cumul Observé	%age Observé	% cumulé Observé	Théoriq. Fréq.	Cumul Théoriq.	%age Théoriq.	% Cumulé Théoriq.	Observé- Théoriq.
<=,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,45	0,05	0,05	-0,45
,400	7,00	7,00	0,81	0,81	4,85	5,30	0,56	0,61	2,15
,600	21,00	28,00	2,42	3,23	14,80	20,09	1,71	2,32	6,20
,800	18,00	46,00	2,08	5,31	27,98	48,07	3,23	5,54	-9,98
1,00	48,00	94,00	5,54	10,84	41,43	89,50	4,78	10,32	6,57
1,20	58,00	152,00	6,69	17,53	52,93	142,43	6,10	16,43	5,07
1,40	57,00	209,00	6,57	24,11	61,28	203,71	7,07	23,50	-4,28
1,60	65,00	274,00	7,50	31,60	66,12	269,83	7,63	31,12	-1,12
1,80	52,00	326,00	6,00	37,60	67,68	337,51	7,81	38,93	-15,68
2,00	65,00	391,00	7,50	45,10	66,48	403,99	7,67	46,60	-1,48
2,20	64,00	455,00	7,38	52,48	63,19	467,19	7,29	53,89	0,81
2,40	61,00	516,00	7,04	59,52	58,48	525,66	6,74	60,63	2,52
2,60	52,00	568,00	6,00	65,51	52,91	578,57	6,10	66,73	-0,91
2,80	45,00	613,00	5,19	70,70	46,98	625,55	5,42	72,15	-1,98
3,00	38,00	651,00	4,38	75,09	41,03	666,58	4,73	76,88	-3,03
3,20	33,00	684,00	3,81	78,89	35,34	701,93	4,08	80,96	-2,34
3,40	29,00	713,00	3,34	82,24	30,07	732,00	3,47	84,43	-1,07
3,60	35,00	748,00	4,04	86,27	25,31	757,30	2,92	87,35	9,69
3,80	27,00	775,00	3,11	89,39	21,09	778,39	2,43	89,78	5,91
4,00	24,00	799,00	2,77	92,16	17,43	795,82	2,01	91,79	6,57
4,20	17,00	816,00	1,96	94,12	14,29	810,11	1,65	93,44	2,71
4,40	14,00	830,00	1,61	95,73	11,63	821,74	1,34	94,78	2,37
4,60	9,00	839,00	1,04	96,77	9,41	831,16	1,09	95,87	-0,41
4,80	10,00	849,00	1,15	97,92	7,57	838,72	0,87	96,74	2,43
5,00	8,00	857,00	0,92	98,85	6,06	844,78	0,70	97,44	1,94
5,20	3,00	860,00	0,35	99,19	4,82	849,60	0,56	97,99	-1,82
5,40	1,00	861,00	0,12	99,31	3,82	853,42	0,44	98,43	-2,82
5,60	3,00	864,00	0,35	99,65	3,01	856,43	0,35	98,78	-0,01
5,80	1,00	865,00	0,12	99,77	2,37	858,80	0,27	99,05	-1,37
6,00	1,00	866,00	0,12	99,88	1,86	860,66	0,21	99,27	-0,86
6,20	1,00	867,00	0,12	100,00	1,45	862,11	0,17	99,44	-0,45
6,40	0,00	867,00	0,00	100,00	1,13	863,23	0,13	99,57	-1,13
6,60	0,00	867,00	0,00	100,00	0,87	864,11	0,10	99,67	-0,87
Infini	0,00	867,00	0,00	100,00	2,89	867,00	0,33	100,00	-2,89



ANNEXE 2

Analyse de la préférence perceptive pour la vitesse

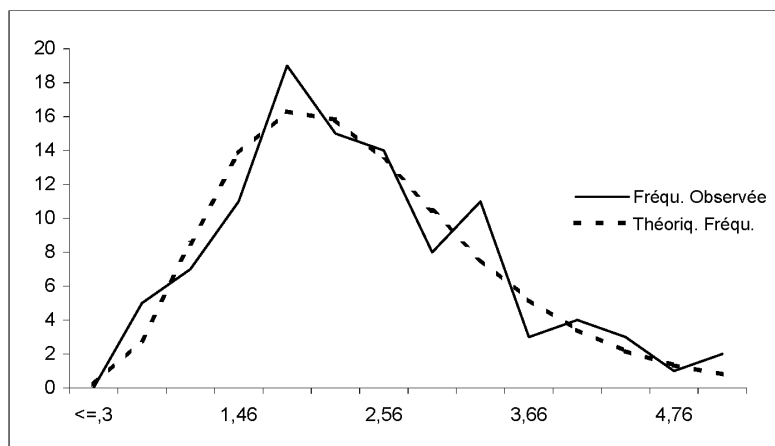
Statistiques descriptives de la distribution des moyennes de Pf

Variable Pf ; distribution: Gamma n (intervalles) Min Max Echelle Forme
 15,00 0,00 5,50 0,45 4,86

Kolmogorov-Smirnov d = ,0236004, p = n.s.

Chi ² : 4,329401, dl = 6, p = ,6321965 (dl ajustés)

Classes	Fréq. Observée	Cumul Observé	%age Observé	% cumulé Observé	Théoriq. Fréq.	Cumul Théoriq.	%age Théoriq.	% Cumulé Théoriq.	Observé- Théoriq.
<=,3	0	0	0,00	0,00	0,20	0,20	0,19	0,19	-0,20
,733	5	5	4,85	4,85	2,82	3,02	2,74	2,93	2,18
1,10	7	12	6,80	11,65	8,52	11,54	8,27	11,21	-1,52
1,46	11	23	10,68	22,33	13,84	25,38	13,44	24,64	-2,84
1,83	19	42	18,45	40,78	16,30	41,68	15,83	40,47	2,70
2,20	15	57	14,56	55,34	15,81	57,50	15,35	55,82	-0,81
2,56	14	71	13,59	68,93	13,47	70,97	13,08	68,90	0,53
2,93	8	79	7,77	76,70	10,46	81,43	10,16	79,06	-2,46
3,30	11	90	10,68	87,38	7,58	89,01	7,35	86,41	3,42
3,66	3	93	2,91	90,29	5,20	94,20	5,05	91,46	-2,20
4,03	4	97	3,88	94,17	3,41	97,62	3,31	94,77	0,59
4,40	3	100	2,91	97,09	2,16	99,78	2,10	96,88	0,84
4,76	1	101	0,97	98,06	1,33	101,11	1,29	98,17	-0,33
5,13	2	103	1,94	100,00	0,80	101,91	0,78	98,95	1,20
Infini	0	103	0,00	100,00	1,09	103,00	1,05	100,00	-1,09



ANNEXE 3

Analyse de la préférence perceptive pour la vitesse

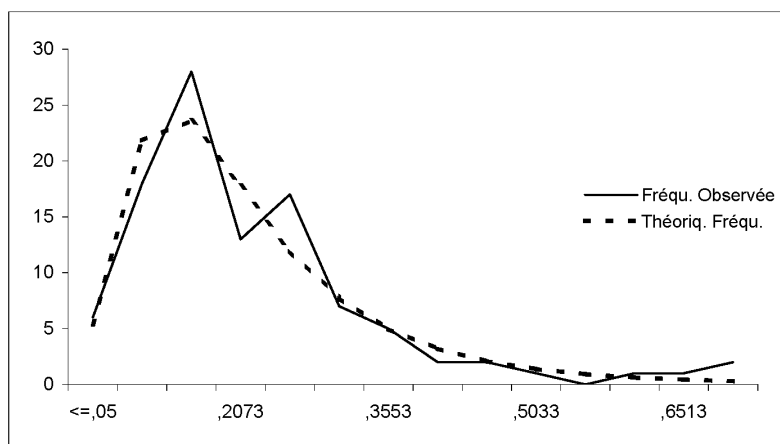
Statistiques descriptives de la distribution des coefficient de variation de Pf

	n (intervalles	Min	Max	Echelle	Forme
Coeff Var distribution: Log-Normale	15,00	0,01	0,75	-1,83	0,37

Kolmogorov-Smirnov d = ,0350458, p = n.s.

Chi² : 5,249338, dl = 5, p = ,3862361 (dl ajustés)

Classes	Fréq. Observée	Cumul Observé	%age Observé	% cumulé Observé	Théoriq. Fréq.	Cumul Théoriq.	%age Théoriq.	% Cumulé Théoriq.	Observé- Théoriq.
<=,05	6	6	5,8252425	5,8252425	5,3735356	5,3735356	5,2170248	5,2170248	0,6264644
,1086	18	24	17,475729	23,30097	21,818363	27,191898	21,182877	26,3999	-3,818363
,1580	28	52	27,184465	50,485435	23,619648	50,811546	22,931698	49,3316	4,380352
,2073	13	65	12,621359	63,106796	17,798172	68,609718	17,279779	66,611374	-4,798172
,2566	17	82	16,504854	79,611649	11,953028	80,562744	11,604881	78,216255	5,0469723
,3060	7	89	6,7961164	86,407768	7,7340708	88,296814	7,5088067	85,72506	-0,734071
,3553	5	94	4,8543692	91,262138	4,9664621	93,263283	4,8218079	90,546875	0,0335379
,4046	2	96	1,9417475	93,20388	3,2049789	96,468262	3,11163	93,658508	-1,204979
,4540	2	98	1,9417475	95,14563	2,0898094	98,558067	2,0289412	95,687447	-0,089809
,5033	1	99	0,9708738	96,116508	1,3799756	99,938042	1,3397821	97,027222	-0,379976
,5526	0	99	0	96,116508	0,9234968	100,86154	0,8965988	97,923828	-0,923497
,6020	1	100	0,9708738	97,087379	0,6263069	101,48785	0,6080649	98,531891	0,3736931
,6513	1	101	0,9708738	98,05825	0,430283	101,91813	0,4177505	98,949638	0,569717
,7006	2	103	1,9417475	100	0,2992872	102,21741	0,2905701	99,240211	1,7007128
Infini	0	103	0	100	0,7825828	103	0,7597891	100	-0,782583



ANNEXE 4
Préférence perceptive et mouvement imaginé
Filtrage et statistiques descriptives des indices calculés.

Données Brutes								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
nb sujet	40	41	39	38	158	114		
nb observation	320	328	312	304	1264	912		
Min	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05		
1 quantile	1,50	1,76	1,30	1,47	1,52	1,38		
mediane	2,19	2,43	2,21	2,24	2,26	2,13		
3 eme quantile	3,38	3,10	3,42	3,46	3,33	3,11		
Max	14,84	5,59	12,88	6,55	14,84	43,28		
Asymetrie	2,57	0,02	1,50	0,35	2,00	9,29		
kurtosis	10,17	-0,27	3,93	-0,50	9,16	154,13		
Moyenne	2,64	2,40	2,60	2,50	2,53	2,44		
Ecartype	1,98	0,97	1,80	1,32	1,57	2,14		

Après filtrage des 2,5 % Extrêmes								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
nb restant	303	313	298	289	1201	867		
Min	0,24	0,50	0,20	0,35	0,31	0,35		
1 quantile	1,53	1,78	1,33	1,52	1,55	1,43		
mediane	2,19	2,40	2,19	2,24	2,27	2,13		
3 eme quantile	3,27	3,00	3,35	3,41	3,27	3,00		
Max	7,91	4,01	7,24	5,09	6,22	6,04		
Asymetrie	1,12	-0,16	0,81	0,29	0,47	0,58		
kurtosis	1,90	-0,68	0,27	-0,88	-0,30	-0,16		
Moyenne	2,47	2,38	2,48	2,49	2,44	2,28		
Ecartype	1,36	0,87	1,48	1,20	1,18	1,10		

Compte du nombre de captures observées								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
NB obs	28	49	39	34	154	97		
% off	0,09	0,15	0,13	0,11	0,12	0,11		
0	18	15	20	15	62	56		
1	14	13	10	15	52	32		
2	4	6	2	6	18	12		
3	2	5	6	1	11	5		
4	0	1	0	1	4	4		
5	0	1	0	0	2	2		
6	0	0	0	0	0	0		
7	0	0	1	0	1	0		
8	0	0	0	0	0	0		

Nombre de Valeur Pf restantes après Filtrage des extrêmes et captures								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
1	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0		
5	2	2	5	2	13	5		
6	4	7	2	7	17	16		
7	16	11	10	13	55	34		
8	16	14	17	13	58	48		
Total restant	38	34	34	35	143	103		
%	0,95	0,83	0,87	0,92	0,91	0,90		

Répartition de la population								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
M	0,32	0,44	0,50	0,34	0,40	0,43		
F	0,68	0,56	0,50	0,66	0,60	0,57		
G	0,11	0,00	0,12	0,17	0,09	0,13		
D	0,89	1,00	0,88	0,83	0,91	0,87		

Statistiques descriptives de la distribution des valeurs moyennes de Pf								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
Min	0,47	0,71	0,79	0,45	0,45	0,48		
1 quantile	1,65	1,79	1,62	1,65	1,64	1,53		
mediane	2,27	2,28	2,19	2,22	2,25	2,12		
3 eme quantile	3,11	2,87	2,89	3,24	3,05	2,79		
Max	6,95	3,52	5,18	4,26	5,00	4,90		
moyenne	2,48	2,25	2,34	2,38	2,36	2,21		
ecartype	1,26	0,72	1,11	1,05	1,02	0,97		
asymetrie	1,22	-0,34	0,70	0,27	0,34	0,59		
kurtosis	2,92	-0,45	0,07	-0,80	-0,44	0,03		
moyenne geometrique	2,17	2,11	2,09	2,13	2,12	1,98		

Statistiques descriptives de la distribution des coefficients de variation de Pf								
Condition	C_1	C_2	C_3	C_4	Total Expé 2	Rappel Expé 1		
Min	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04		
1 quantile	0,11	0,11	0,14	0,08	0,11	0,11		
mediane	0,20	0,13	0,20	0,12	0,16	0,16		
3 eme quantile	0,27	0,18	0,40	0,18	0,24	0,23		
Max	0,56	0,52	0,92	0,48	0,66	0,66		
moyenne	0,21	0,16	0,28	0,16	0,21	0,19		
ecartype	0,12	0,10	0,22	0,12	0,15	0,13		
asymetrie	0,88	1,99	1,53	1,69	1,94	1,74		
kurtosis	0,86	4,96	1,85	2,13	5,05	3,58		
moyenne geometrique	0,18	0,14	0,22	0,13	0,17	0,16		

ANNEXE 5

Préférence perceptive et principes moteur.

Paramètres des régressions de puissance

Forme	Ordre	Perception			Production		
		γ	$\log Po$	ρ	γ	$\log Po$	ρ
Ellipse	Per	0,51	-0,2	0,93	0,5	-0,36	0,98
Ellipse	Per	0,8	-0,83	0,92	0,78	-1	0,98
Ellipse	Per	0,42	-0,16	0,74	0,49	-0,59	0,96
Ellipse	Per	0,23	-0,16	0,56	0,56	-0,7	0,92
Ellipse	Per	0,37	-0,46	0,67	0,39	-0,77	0,9
Ellipse	Per	0,29	-0,7	0,85	0,3	-0,73	0,97
Ellipse	Per	0,21	0,17	0,64	0,21	0,01	0,91
Trait	Per	0,46	-0,51	0,75	0,55	-0,81	0,9
Trait	Per	0,57	-0,57	0,85	0,54	-0,7	0,97
Trait	Per	0,47	-0,31	0,88	0,49	-0,72	0,95
Trait	Per	0,53	-0,72	0,94	0,47	-0,71	0,96
Trait	Per	0,69	-0,88	0,93	0,57	-0,9	0,89
Trait	Per	0,32	-0,65	0,73	0,51	-0,89	0,96
Trait	Per	0,33	-0,29	0,77	0,46	-0,84	0,91
Pointage	Per	0,78	-0,62	0,97	0,65	-0,74	0,97
Pointage	Per	0,37	-0,26	0,76	0,38	-0,34	0,97
Pointage	Per	0,61	-0,46	0,9	0,74	-0,69	0,99
Pointage	Per	0,49	-0,24	0,86	0,56	-0,57	0,94
Pointage	Per	0,84	-0,78	0,93	0,81	-0,76	0,98
Pointage	Per	1,18	-1	0,98	0,56	-0,48	0,97
Pointage	Per	0,55	-0,34	0,81	0,6	-0,72	0,95
Ellipse	Pro	0,44	-0,34	0,78	0,57	-0,48	0,95
Ellipse	Pro	0,46	-0,35	0,96	0,56	-0,58	0,9
Ellipse	Pro	0,43	-0,45	0,85	0,4	-0,26	0,94
Ellipse	Pro	0,38	-0,24	0,84	0,45	-0,36	0,93
Ellipse	Pro	0,54	-0,44	0,86	0,59	-0,85	0,96
Ellipse	Pro	0,37	-0,19	0,76	0,45	-0,53	0,93
Ellipse	Pro	0,54	-0,41	0,92	0,58	-0,56	0,96
Trait	Pro	0,83	-0,98	0,94	0,5	-0,69	0,97
Trait	Pro	0,8	-0,76	0,96	0,93	-0,69	0,97
Trait	Pro	0,36	-0,93	0,93	0,34	-0,76	0,94
Trait	Pro	0,83	-0,95	0,94	0,65	-0,79	0,97
Trait	Pro	0,94	-1,15	0,96	0,77	-1,07	0,92
Trait	Pro	0,66	-0,86	0,9	0,54	-0,78	0,91
Trait	Pro	0,29	-0,05	0,86	0,37	-0,4	0,92
Pointage	Pro	0,62	-0,55	0,94	0,55	-0,43	0,96
Pointage	Pro	0,5	-0,17	0,95	0,48	-0,43	0,97
Pointage	Pro	0,82	-0,44	0,97	0,78	-0,54	0,97
Pointage	Pro	0,74	-0,4	0,97	0,7	-0,49	0,97
Pointage	Pro	0,52	-0,31	0,95	0,64	-0,52	0,98
Pointage	Pro	0,69	-0,72	0,96	0,51	-0,43	0,98
Pointage	Pro	0,58	-0,37	0,92	0,63	-0,48	0,97

Les valeurs en gras signalent les paramètres pour lesquels l'analyse de régression indique une absence de significativité. Le coefficient de corrélation est testé par le F de Fisher et un test t est utilisé pour tester γ et $\log Po$. La valeur Po est donnée par $10^{\log Po}$.

ANNEXE 6
Préférence perceptive et développement
Paramètres des régressions de puissance

Age	Forme	log Po	γ	ρ
7	Ellipse	-0,25	0,42	0,59
7	Ellipse	-0,22	0,33	0,74
7	Ellipse	-0,26	0,45	0,79
7	Ellipse	0,24	-0,14	0,18
7	Ellipse	-0,41	0,43	0,66
7	Ellipse	0,11	0,14	0,38
7	Ellipse	-0,3	0,44	0,89
7	Ellipse	-0,61	0,39	0,68
7	Ellipse	-0,35	0,51	0,68
7	Ellipse	-0,28	0,37	0,58
7	Ellipse	0,15	0,17	0,28
7	Ellipse	-0,1	0,27	0,77
7	Ellipse	-0,35	0,45	0,78
7	Ellipse	-0,51	0,54	0,94
7	Ellipse	-0,54	0,33	0,43
9	Ellipse	-0,58	0,67	0,95
9	Ellipse	-0,67	0,56	0,9
9	Ellipse	-0,77	0,56	0,88
9	Ellipse	-0,63	0,51	0,93
9	Ellipse	-0,33	0,37	0,84
9	Ellipse	0	0,34	0,89
9	Ellipse	-0,21	0,35	0,83
9	Ellipse	-0,13	0,46	0,88
9	Ellipse	-0,28	0,62	0,92
9	Ellipse	-0,33	0,4	0,76
9	Ellipse	-0,24	0,45	0,8
9	Ellipse	-0,3	0,36	0,77
9	Ellipse	-0,15	0,38	0,81
9	Ellipse	-0,04	0,27	0,73
9	Ellipse	-0,07	0,33	0,87
11	Ellipse	-0,13	0,44	0,96
11	Ellipse	0,07	0,26	0,67
11	Ellipse	-0,23	0,42	0,85
11	Ellipse	-0,22	0,37	0,92
11	Ellipse	-0,14	0,4	0,92
11	Ellipse	-0,56	0,53	0,93
11	Ellipse	-0,4	0,37	0,79
11	Ellipse	-0,22	0,44	0,93
11	Ellipse	-0,08	0,3	0,76
11	Ellipse	-0,26	0,37	0,83
11	Ellipse	0,16	0,26	0,73
11	Ellipse	-0,13	0,36	0,68
11	Ellipse	-0,02	0,28	0,62
11	Ellipse	-0,33	0,36	0,89
11	Ellipse	0	0,26	0,88

Les valeurs en gras du coefficient de corrélation signalent que l'analyse de régression n'est pas significative.

L'analyse de variance des valeurs du coefficient de corrélation est faite sur les valeurs de la transformée Z de Fisher.

Cette thèse est consacrée à la perception visuelle des mouvements humains. L'objectif est de démontrer l'existence de liaisons fonctionnelles entre la perception et la motricité en utilisant des données issues de l'imagerie cérébrale, de l'étude de cas clinique (maladie de Parkinson) et de l'analyse comportementale de sujets adultes et d'enfants. Dans un premier temps, les recherches ont consisté à identifier les structures assurant ces liaisons fonctionnelles. La tomographie par émission de positon est utilisée pour révéler les réseaux neuronaux activés lors de la perception visuelle des mouvements d'écriture et de pointage. Les résultats indiquent que la perception de ces deux catégories de mouvements implique des structures distinctes ayant un rôle dans la planification et l'exécution de ces mouvements. Dans un second temps, les recherches ont consisté à préciser le rôle de ces liens entre perception et motricité. Dans ce but, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à un phénomène de préférence perceptive pour la vitesse, dans le cas des mouvements de traçage et de pointage. Après avoir démontré et analysé en détail ce phénomène de préférence perceptive, nous avons étudié la façon dont ces préférences sont modulées en fonction de la représentation que le sujet a du mouvement, de la longueur de la trajectoire, du type de mouvement, du niveau de développement moteur, et de l'état du système moteur des sujets (maladie de Parkinson). Les résultats principaux montrent que : 1) les valeurs des périodes préférées pour un cycle du mouvement révèlent l'existence d'une tendance centrale dans les choix ; 2) les périodes préférées sont comparables aux périodes des mouvements imaginés ; 3) la modulation de la période de référence du sujet dépend, comme dans le cas de l'exécution des mouvements, d'un tempo et d'un paramètre d'échelle ; 4) les valeurs de ces paramètres dépendent du type de mouvement, pour la perception comme pour l'action. Cet ensemble de données permet de penser que la préférence perceptive s'appuie sur un processus de simulation motrice intériorisée du mouvement perçu se déroulant à un niveau implicite. La préférence perceptive pour la vitesse serait la manifestation d'une tendance naturelle du sujet à préférer des stimuli dynamiques conformes à sa propre motricité.

Mots clés : perception visuelle, mouvements de traçage et de pointage, préférence perceptive, lois motrices, simulation motrice.

This dissertation concerns the visual perception of human motions. The aim was to demonstrate the functional relations between perception and action using evidences from a neuroimaging study, the study of clinical cases (Parkinson's disease), and the analysis of adults and children behavior. Firstly, the research focuses on the identification of the structure that enables these functional relations. The positron emission tomography was used to reveal the neural network involved in the visual perception of writing and pointing movements. The results show that the perception of these two categories of movements activate distinct neural networks that also participate in the planning and the implementation of these movements. Secondly, the researches outline the role of these relations between perception and action. We focus on a phenomenon of perceptual preference for the velocity of drawing and pointing movements. After a demonstration and an analysis of this phenomenon, we study the way these preferences are modulated by the subject's representation of the motion, the length of the motion's trajectory and the category of the movement. The roles of the level of the subject's motor development and of the state of the subject's motor system (Parkinson's disease) are also tested. The main results show that : 1) the distribution of the favorite periods indicate a central tendency in the choices ; 2) favorite periods and imagined actions duration are comparable ; 3) as for real movements, the modulation of the perceptual preferences depends on a baseline tempo and a scaling factor ; 4) the values of the above mentioned parameters depend on the category of the movement as for perception and action. Taken together, the results suggest that perceptual preferences rely on an implicit motor simulation of the perceived movement. The perceptual preference for movement velocity could reflect a natural tendency of the observer to prefer dynamic events that are compatible with its own motor system.

Keywords: visual perception, drawing and pointing movements, perceptual preference, motor principles, motor simulation.